



Université Mohamed Khider de Biskra
Sciences et Techniques
Génie Mécanique

MÉMOIRE DE

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Traka Bouzid

Le : 06/07/2021

Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation agricole

Jury :

Pr.	Amrane Mohamed Nadir	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	Baci Lamine	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Mr.	Benarfaoui Arfaoui	MAA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2020 - 2021

Dédicaces

Au nom de dieu le Miséricordieux

Je dédie ce modeste travail A la mémoire de mon père ;

*A ma très chère mère, qui a tout fais pour m'offrir un
climat idéal de travail, je ne la remercierai jamais
assez, que dieu la protège.*

*A mes frères : **Gatt Abdelkarim et Abdellaoui Tawfik**
Lahmar Abdellah ;*

A toute ma famille ; A tous mes amis (es).

Remerciement

Tout d'abord nous tenons à remercier le bon dieu pour nous avoir guidés à bien mener ce travail.

*Nos remerciements les plus vifs et chaleureux vont à notre promotrice **Dr. Bassi Lamine**, pour son aide, sa disponibilité et son soutien.*

Nous adressons notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions également les membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur d'évaluer notre travail.

Résumé

Le rayonnement solaire est une ressource pérenne d'énergie, disponible partout sur la planète, gratuite et entièrement renouvelable. Les systèmes photovoltaïques ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible. Ils reçoivent et convertissent automatiquement le rayonnement solaire en électricité.

L'Utilisation de l'énergie solaire dans des endroits isolés pour différentes applications telles que Le pompage de l'eau est d'une importance fondamentale pour l'irrigation agricole. Dans ce travail, nous avons réalisé une étude de dimensionnement d'un système de pompage d'eau photovoltaïque et identifié tous les éléments du système pour y parvenir à l'aide d'un programme PVsyst.

ملخص :

الإشعاع الشمسي هو مصدر طاقة مستدام , متوفر في كل مكان على كوكب الأرض , مجاني ومتجدد بالكامل , الأنظمة الكهروضوئية لا تتطلب أي مدخلات وقود خارجية إنهم يتلقون ويحولون الإشعاع الشمسي تلقائيا إلى كهرباء. إن استخدام الطاقة الشمسية في الأماكن المعزولة لتطبيقات مختلفة مثل ضخ المياه له أهمية أساسية للري الزراعي.

في هذا العمل , اجرينا دراسة تحجيم لنظام ضخ المياه الكهروضوئية وحددنا جميع عناصر النظام لتحقيقه بمساعدة برنامج PVsyst.

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
Liste de figure	
List de tableau	
Sommaire	
Introduction général	I

Chapitre I: Généralité sur énergie photovoltaïque

1.1. Introduction.....	1
1.2. Historique de photovoltaïque	1
1.3. Énergie solaire	1
1.3.1 Énergie solaire passive	2
1.3.2 Énergie solaire thermique.....	2
1.3.3 Énergie solaire photovoltaïque	2
1.4 Effet photovoltaïque.....	3
1.4.1 Cellule photovoltaïque	3
1.4.2 Le principe de fonctionnement	4
1.4.3 Types des cellules.....	5
1.5. Modèle d'une cellule solaire	6
1.5.1 Association en série.....	6
1.5.2 Association en parallèle.....	7
1.5.3 Association mixte	8
1.6. Influence du rayonnement sur les cellules.....	8
1.7. Influence de la température sur le rendement des cellules.....	9
1.8. Types des systèmes PV	10
1.8.1 Systèmes hybrides	10
1.8.2 Systèmes photovoltaïques autonomes	11
1.8.3 Systèmes autonomes sans stockage électrochimique	11
1.8.4 Systèmes autonomes avec stockage électrochimique	11
1.9. Rendement	12
1.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	13

Chapitre II: Dimensionnement d'une pompe Photovoltaïques

2.1. Introduction.....	14
2.2. Le pompage solaire	14
2.2.1. Pompage au fil du soleil	14
2.2.2 Pompage avec batteries	15
2.3. Les Composants d'un système de pompage PV	16
2.3.1 Le générateur photovoltaïque	16
2.3.2 Le groupe de motopompe	17
2.4. Classification selon la conception de la pompe	17
2.4.1 Les pompes	17
2.4.1.1 Pompe centrifuge	18
2.4.1.2 Pompes volumétriques.....	19
2.5. Classification selon la position de pompe	20
2.5.1 Pompes de surface.....	20
2.5.2 Pompes immergées.....	21
2.6. Classification selon le moteur utilisé.....	22
2.6.1 Moteurs	22
2.6.1.1 Moteur à courant continu.....	22
2.6.1.2 Moteurs à courant alternatif.....	22
2.7. L'électronique de commande et de contrôle.....	24
2.7.1 Le convertisseur DC/AC (onduleur).....	24
2.7.2 La partie stockage.....	25
2.8. Conclusion	26

Chapitre III: Dimensionnement du système de Pompage PV

3.1. Introduction.....	28
3.2. Méthode de dimensionnement	28
3.3. Besoins journaliers en eau.....	29
3.4. Dimensionnement et choix de la pompe	29
3.4.1 Détermination du débit horaire de la pompe Q_p en (m ³ /h).....	30
3.4.2 Calcul du rabattement	30
3.4.3 Conduite de refoulement	31
3.4.4 Perte de charge totale et la HMT	32
3.4.5 Calcul de la hauteur d'élévation requise pour la motopompe	33

3.5	Calcul de l'énergie électrique nécessaire par jour	33
3.6.	Énergie solaire disponible et dimensionnement du champ photovoltaïque	33
3.6.1	Énergie solaire disponible	33
3.6.2	Dimensionnement du champ photovoltaïque	34
3.6.2.1	Calcul de la puissance crête	34
3.6.2.2	Tension du système	34
3.6.2.3	Calcul de nombre de panneaux solaire	34
3.7	Critères de Choix de type de pompes	35
3.8	Dimensionnement des batteries	37
3.8.1	Capacité totale de batteries	37
3.8.2	Nombre total de batteries.....	37
3.8.3	Nombre de batteries en série et en parallèle	37
3.9	Régulateur de charge.....	38
3.10	Section du câble	38
3.11	Conclusion	40
Chapitre IV: Dimensionnement par PVsyst		
4.1.	Introduction.....	41
4.2.	Dimensionnement de la system.....	41
Conclusion général		55
Bibliographies		56

List de Figure

Figure 1.1:	Structure d'une cellule solaire.....	03
Figure 1.2:	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	04
Figure 1.3:	Cellule monocristalline.....	05
Figure 1.4:	Cellule polycristalline.....	05
Figure 1.5:	Cellule amorphe.....	06
Figure 1.6:	Cellules identiques en série.....	07
Figure 1.7:	Cellules identiques en parallèle.....	07
Figure 1.8:	Influence de rayonnement sur la caractéristique (I-V).....	08
Figure 1.9:	Influence de la puissance sur la caractéristique (P-V).....	09
Figure 1.10:	Influence de la température sur la caractéristique(I-V).....	09
Figure 1.11:	Influence de la température sur la caractéristique (P-V).....	10
Figure 1.12:	Système PV autonome sans batterie	12
Figure 1.13:	Système PV autonome avec batteries.....	12
Figure 2.1:	Pompage photovoltaïque au fil du soleil.....	15
Figure 2.2 :	Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie.....	16
Figure 2.3:	Champ photovoltaïques.....	17
Figure 2.4 :	Pompe centrifuge.....	18
Figure 2.5 :	Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.....	19
Figure 2.6 :	Pompe volumétrique.....	20
Figure 2.7 :	Caractéristiques d'une pompe volumétrique. [6].....	20
Figure2.8:	Pompes de surface.....	21
Figure 2.9:	Pompe immergée.....	21
Figure 2.10 :	Moteur à courant continu.....	22
Figure 2.11 :	Moteur synchrone.....	23
Figure 2.12 :	Moteur asynchrone.....	24
Figure 2.13:	onduleur (SPA CONDOR ELECTRONIQUE).....	25
Figure 3.1:	Système de pompage d'eau avec stockage.....	28
Figure 3.2 :	Chaîne de conversion d'un pompage PV au fil du soleil.....	33
Figure 3.3 :	Critère de choix de pompe selon besoin journalier et Hmt.....	34
Figure 4.1 :	Etape 1 PVsyst.....	41

Figure 4.2 :	Etape 2 PVsyst.....	42
Figure 4.3 :	Etape 3 PVsyst.....	42
Figure 4.4 :	Etape 4 PVsyst.....	43
Figure 4.5 :	Etape 5 PVsyst.....	43
Figure 4.6 :	Etape 6 PVsyst.....	44
Figure 4.7 :	Etape 7 PVsyst.....	44
Figure 4.7 :	Etape 7 PVsyst.....	45
Figure 4.8 :	Etape 8 PVsyst.....	46
Figure 4.9 :	Etape 9 PVsyst.....	47
Figure 4.10 :	Etape 10 PVsyst.....	48
Figure 4.11 :	Etape 11 PVsyst.....	49
Figure 4.12 :	Etape 12 PVsyst.....	50
Figure 4.13 :	Etape 13 PVsyst.....	51

Liste de Tableau

Tableau 1.1:	Classification des pompes.....	17
Tableau 3.1 :	Désignation des paramètres du système de pompage.....	28
Tableau 3.2 :	Tension de système photovoltaïque selon la puissance crête.....	32
Tableau 3.3 :	Section nominale des câbles.....	37

Introduction général

L'eau, source de vie pour l'homme, les animaux et la végétation, est l'une des préoccupations majeures du 21^{ème} siècle pour toute la planète et surtout dans les régions où elle se fait rare. En effet, l'approvisionnement en eau, soit pour la consommation domestique, soit pour l'agriculture (élevage et irrigation) constitue aujourd'hui l'un des plus grands enjeux des temps modernes. L'utilisation de l'énergie solaire est devenue indispensable en Algérie, ce qui rend intéressant l'utilisation de pompage solaire, plusieurs régions demeurent non connectées au réseau public d'électricité.

Dans le cadre de l'amélioration d'approvisionnement en eau pour élevage et irrigation, le recours à l'irrigation par pompage à petite échelle est l'une des utilisations les plus intéressantes de l'énergie solaire. En effet, l'intensité maximale du rayonnement solaire correspond généralement à la période la plus importante en besoin d'eau. D'autre part, le fait que cette énergie est disponible juste au point d'utilisation, l'agriculteur est libéré des problèmes liés à l'approvisionnement en carburant, ou bien de l'existence de lignes de transport de l'électricité.

Dans ce contexte général, notre étude se porte sur l'étude et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque sans batterie. Nous avons structuré notre travail en quatre chapitres :

- ✚ Dans le premier chapitre, nous présentons une approche générale de l'énergie PV.
- ✚ Le deuxième chapitre sera consacré au dimensionnement d'une pompe photovoltaïque.
- ✚ Dans le troisième chapitre, nous présenterons un dimensionnement du système de pompage pv.
- ✚ Le dernier chapitre sera consacré à la Dimensionnement par PVsyst (Logiciel).

Chapitre I :

Généralité sur énergie photovoltaïque

1.1. Introduction

Devant la demande croissante de l'énergie électrique, essentiellement pour les sites isolés (régions sahariennes, régions montagneuses), où le raccordement au réseau électrique public est très coûteux, l'énergie solaire photovoltaïque constitue la solution la plus avantageuse. Car elle est inépuisable, propre et offre une grande sécurité d'utilisation [1]. Ce chapitre présente un état de l'art sur l'énergie photovoltaïque en générale et en particulier le système de pompage solaire. La cellule photovoltaïque est l'élément fondamental de la conversion de l'énergie on va s'étaler sur les avantages et les inconvénients énergie photovoltaïque.

1.2. Historique de photovoltaïque

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

Les premières applications ont lieu dès les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est apte à répondre à une demande croissante d'énergie renouvelable. Elle est considérée comme devant prendre une part significative dans l'approvisionnement énergétique mondial. Celle-ci sera d'autant plus grande et d'autant plus rapide que des méthodes permettant de produire de l'électricité solaire à moindre coût seront utilisées.

La puissance des installations est exprimée en Watt crête (W_c). Le W_c est la puissance fournie par un module photovoltaïque pour un ensoleillement normalisé de $1000W$ par m^2 , à une température de $25^\circ C$. Le rendement électrique est le rapport puissance lumineuse incidente sur puissance électrique fournie. Les modules existants permettent des rendements électriques compris entre 5 et 15% [2].

1.3. Énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ($KW_c = m^2$) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge Les déserts de notre planète reçoivent

Généralité sur énergie photovoltaïque

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés. [3]

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil. Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est donc fondamentale.

1.3.1. Énergie solaire passive

Est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement l'énergie solaire pour le chauffage.

1.3.2. Énergie solaire thermique

À la différence du solaire photovoltaïque, on désigne par énergie solaire thermique la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Le solaire thermique se décline de différentes façons : centrales solaires Thermodynamiques, chauffe-eau solaire, cuisinières et sècheurs solaires.

1.3.3. Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (W_c) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau. [4]

Le soleil est la seule source extérieure d'énergie qui alimente le système terre-océans atmosphère.

Généralité sur énergie photovoltaïque

Le soleil transforme chaque seconde, de façon irréversible, 564 million de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, le soleil est allégé de 4 million de tonnes dispersées sous forme de rayonnement, l'énergie émise par seconde par le soleil est donc d'environ $3,85.10^{26}$ W , cependant seule une infime partie de cette puissance est reçue par la terre du fait du faible angle solide sous lequel est vue notre planète à partir du soleil : environ deux milliards de fois moins, ce qui donne un chiffre qui reste fort respectable (environ $1,9.10^{17}$ W), tel que l'énergie solaire reçue par unité surface perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire, qui est estimée à $1\ 367$ W.m⁻² . [5] [6]

1.4. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Ainsi une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique en mettant en jeu ce phénomène physique optoélectronique.

1.4.1. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est conçue en se basant sur le phénomène physique appelé « effet Photovoltaïque ». Une force électromotrice apparaît lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, sa disposition, température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule [7].

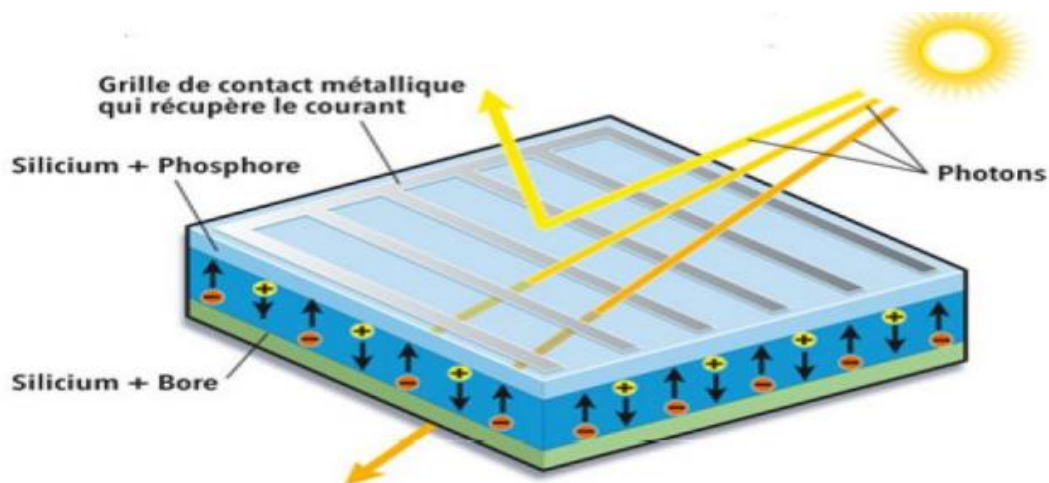


Figure 1.1: Structure d'une cellule solaire. [7]

Généralité sur énergie photovoltaïque

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium comme le montre la figure (1-1), le silicium a quatre électrons dans sa couche de valence, une des couches dopées au phosphore(P) a cinq électrons dans sa couche de valence (surplus d'électrons) et l'autre dopée au bore (B) a trois électrons dans sa couche de valence (déficit d'électrons) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

1.4.2. Le principe de fonctionnement

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons absorbés par un semi-conducteur en porteurs de charges électriques (électrons et trous). Cette création de charges va entraîner la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecté aux électrodes, comme nous montre la figure ci-dessous :

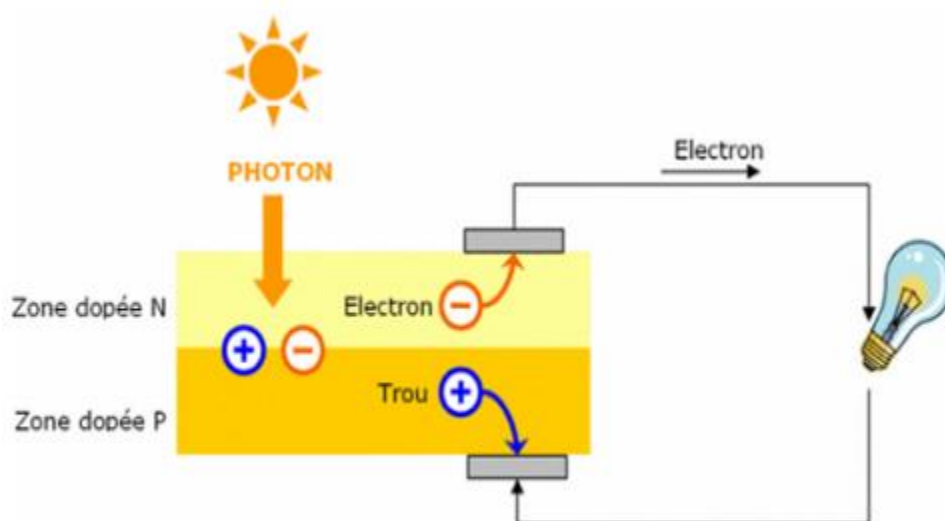


Figure 1.2: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [8].

1.4.3. Types des cellules

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, et chaque type possède un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent [8].

Actuellement, Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle et sont :

- ✚ **Cellules monocristallines** : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi le coût le plus élevé.



Figure 1.3: Cellule monocristalline [9].

- ✚ **Cellules polycristallines** : Leurs coûts de fabrication est moins important, vu leur conception facile. Cependant leur rendement est plus faible.



Figure 1.4: Cellule polycristallines [9].

- ✚ **Cellules amorphes** : Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires

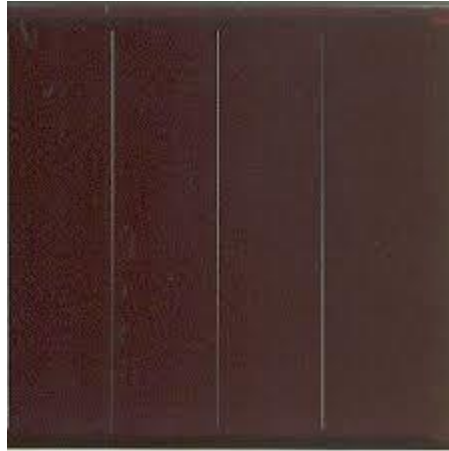


Figure 1.5: Cellule amorphe [9].

1.5. Modèle d'une cellule solaire

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylènevinyl- acétate) figure (1-6) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [9].

1.5.1. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

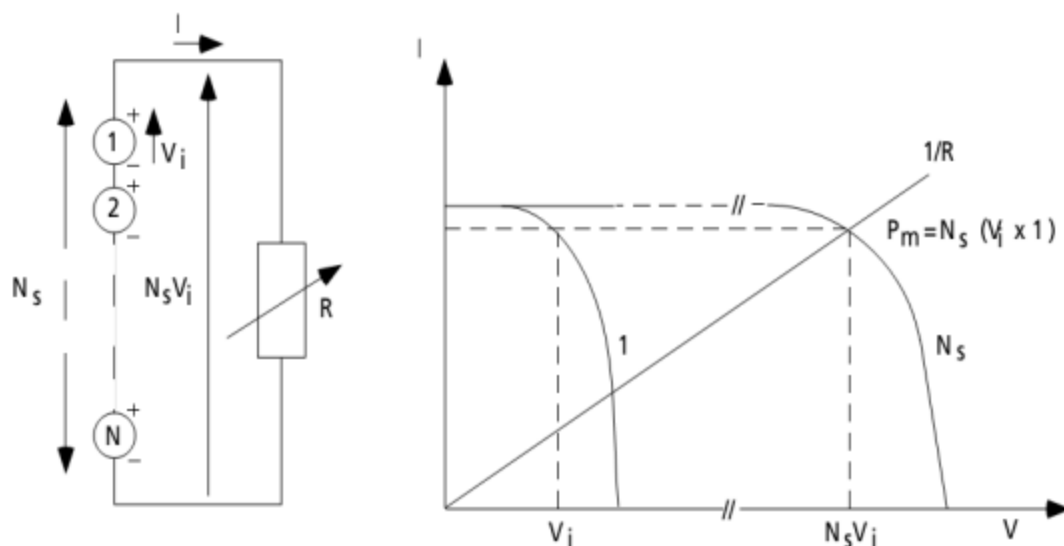


Figure 1.6: Cellules identiques en série [9].

1.5.2. Association en parallèle

En additionnant des cellules ou des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

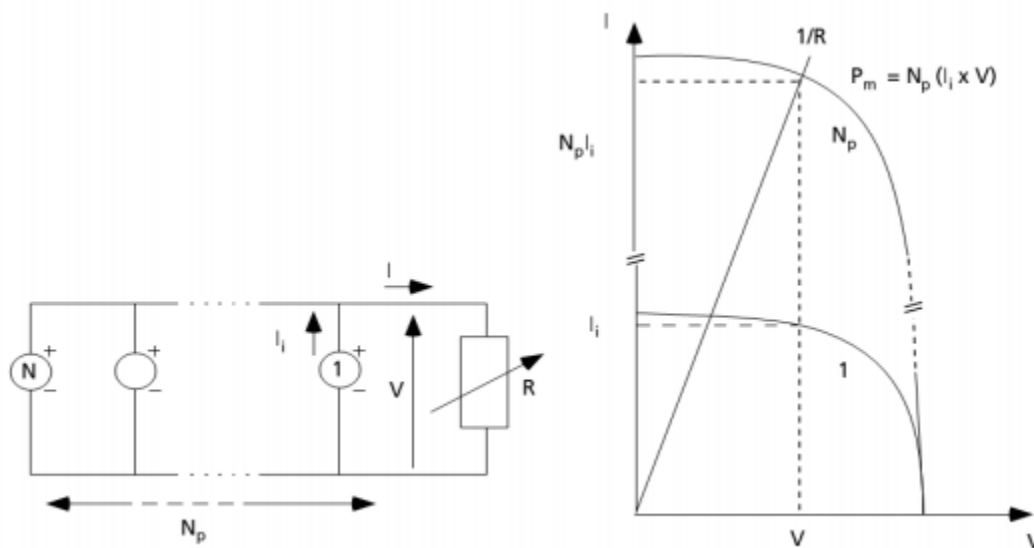


Figure 1.7: Cellules identiques en parallèle [9].

1.5.3. Association mixte :

Pour atteindre une puissance importante il faut associer plusieurs cellules en série Et en parallèle Cette interconnexion des modules forme un module photovoltaïque. La cellule photovoltaïque réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit Plus Elle reçoit d'énergie plus elle en restitue, mais toujours avec un coefficient de rendement

1.6. Influence du rayonnement sur les cellules

Faible la variation des caractéristiques est représentée sur les courbes de la figure1.8 Pour différents niveaux d'irradiation le changement du courant optimal important [10]. Selon les conditions météorologiques nous obtenons différentes courbes avec différentes puissances maximales au cours d'une même journée [11].

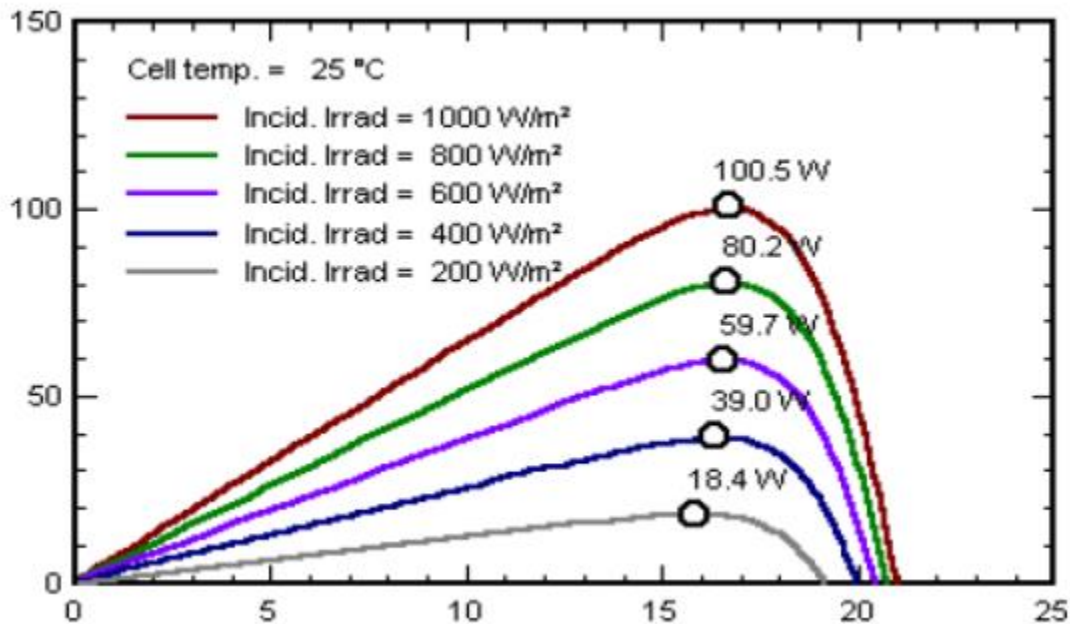


Figure 1.8: Influence de rayonnement sur la caractéristique (I-V) [4].

Même chose remarquée sur les différentes courbes avec différentes puissances maximales. En fixe la température à 25 c°.

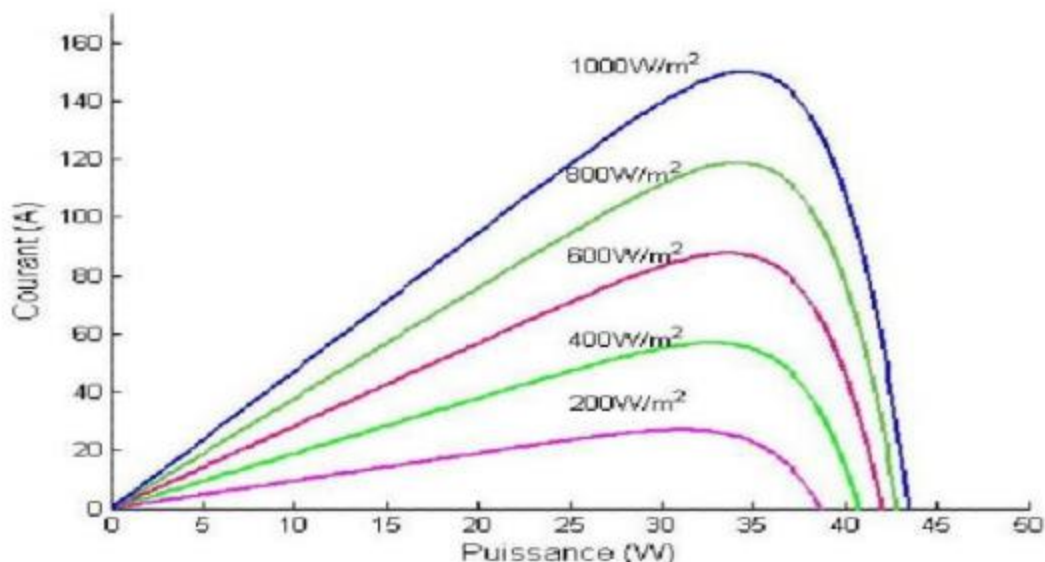


Figure 1.9: Influence de la puissance sur la caractéristique (P-V) [4].

1.7. Influence de la température sur le rendement des cellules

Comme nous l'avons expliqué précédemment la base des cellules photovoltaïques est une jonction PN Ceci nous laisse envisager que son rendement variera selon la température de la jonction [10]. La figure 1.10 ci-dessous montre que la tension à vide d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule Le courant de court-circuit par contre augmente légèrement avec la température de la cellule. [10]. En fixe l'éclairement à 1000 W / m2.

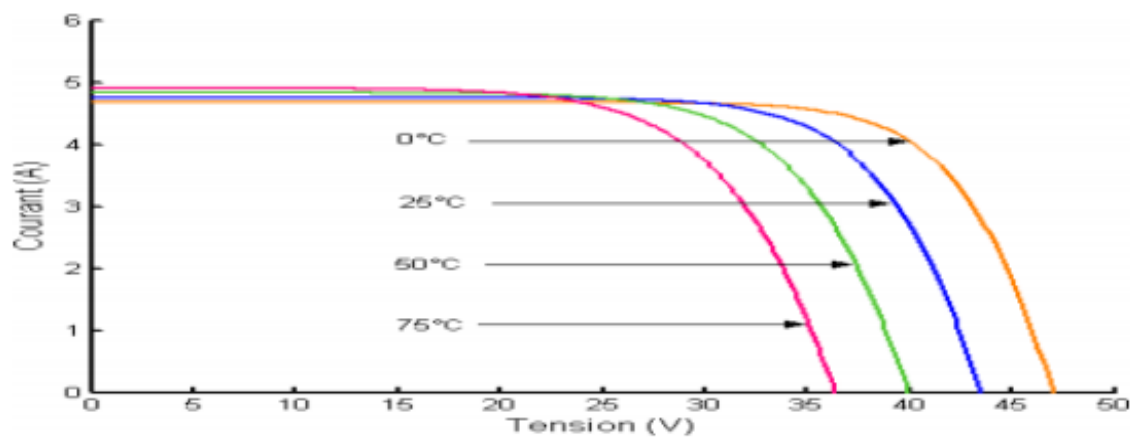


Figure 1.10 : Influence de la température sur la caractéristique (I-V) [10].

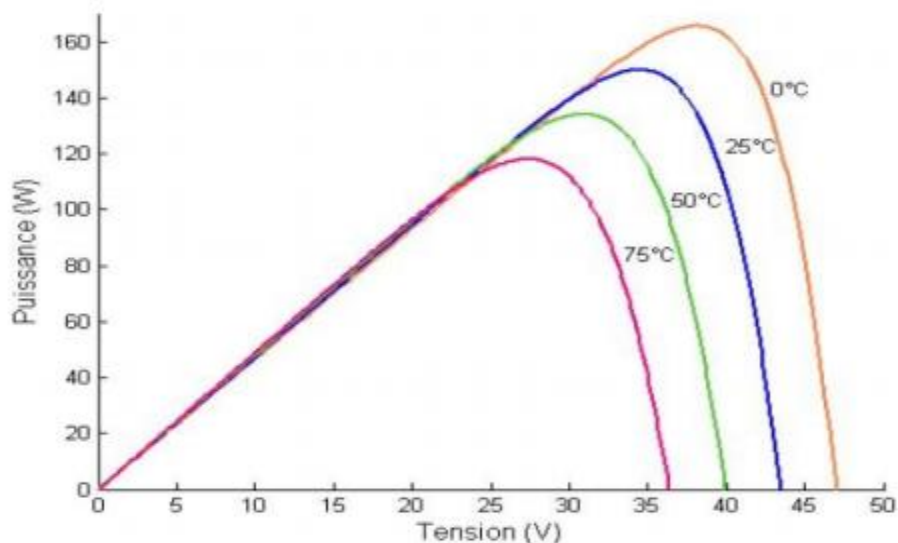


Figure 1.11: Influence de la température sur la caractéristique (P-V) [10].

Même chose remarquée sur la courbe de puissance. En effet, l'augmentation de la température se traduit par une diminution de la puissance maximale disponible [12]. En fixe l'éclairement à 1000 W/m^2 .

1.8. Types des systèmes PV

Systèmes photovoltaïques connectés au réseau :

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est l'application la plus envisagée en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et les façades de bâtiments.

L'intégration d'éléments photovoltaïques dans les structures des bâtiments a de nombreux atouts. En étant connectés au réseau, ces systèmes permettent de s'affranchir des problèmes de stockage et de transport de l'électricité. L'excès de production, après transformation en alternatif à l'aide d'un onduleur, est injecté dans le réseau. En période de non production (la nuit), l'électricité est prélevée sur le réseau. Le compteur tourne alors dans les deux sens [13].

1.8.1. Systèmes hybrides :

Le système hybride est la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables, on prend comme exemple l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, qui permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique [14].

1.8.2. Systèmes photovoltaïques autonomes :

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit [13] :

1.8.3. Systèmes autonomes sans stockage électrochimique

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonome.

La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable en fonction du rayonnement solaire.

1.8.4. Systèmes autonomes avec stockage électrochimique

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

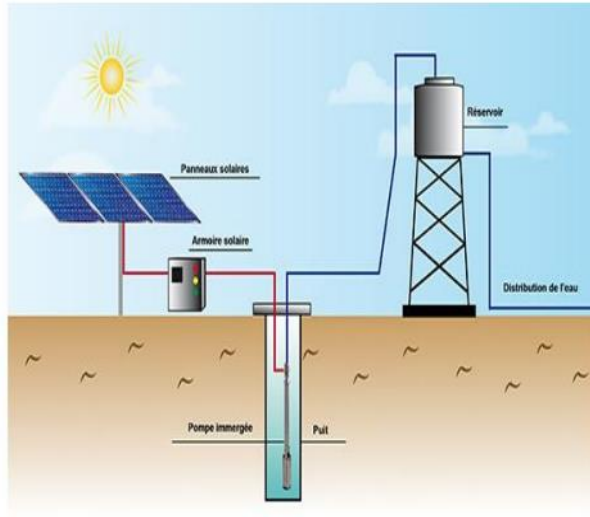


Figure I.12: Système PV autonome sans batterie [12].

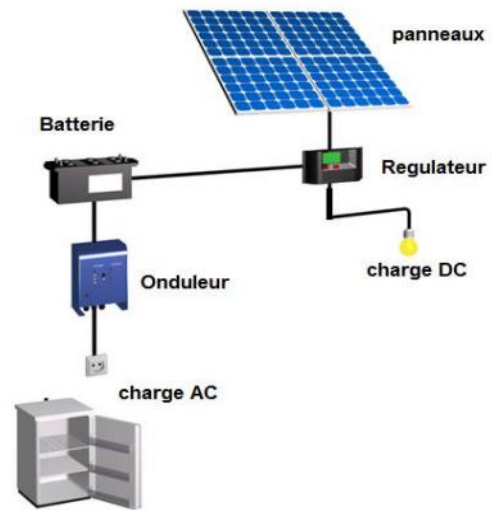


Figure I.13: Système PV autonome avec batteries [12].

1.9. Rendement

L'ensemble des sources de pertes réparties sur une chaîne photovoltaïque sont représentées par le rendement global de la chaîne de conversion. L'éclairement ou bien l'ensoleillement G (W/m^2) est défini comme la quantité d'énergie électromagnétique solaire incidente sur une surface par unité de temps et de surface. La puissance reçue par un générateur de surface A (m^2) est donc égale à $G * A_{eff}$ avec A_{eff} représentant la surface du générateur correspondant à la partie active et susceptible de pouvoir effectuer la conversion photovoltaïque et non la surface Totale occupée par le générateur photovoltaïque. Nous prendrons comme définition du rendement traduisant la qualité de la conversion photons-électrons d'un générateur photovoltaïque noté η_{pv} , le rendement défini selon l'équation.

$$\eta_{pv} = \frac{P_{max}}{G * A_{eff}}$$

Généralité sur énergie photovoltaïque

Où P_{max} est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du générateur photovoltaïque dépendant du matériau photovoltaïque, de l'instant et de l'endroit des mesures des conditions météorologiques et de la température [12].

1.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

➤ Avantages du photovoltaïque [15]:

- L'énergie du soleil est la source la plus renouvelable de toutes.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

➤ Inconvénients du photovoltaïque :

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques qui reviennent cher.
- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux. Cela se traduit dans le prix de l'installation qui, aujourd'hui, reste chère.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe [15].

Chapitre II :
Dimensionnement d'une Pompe
Photovoltaïques

2.1. Introduction:

De nombreuses personnes vivant dans les zones rurales des pays en développement sont confrontées à des problèmes majeurs dus à la pénurie d'eau. Ces problèmes sont particulièrement importants dans les zones désertiques et semi-désertiques. La pénurie d'eau dans les régions arides et semi-arides est un problème vital pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche d'une solution à ce problème. Le sujet de ce chapitre est le pompage solaire photovoltaïque (PV), qui est une solution idéale pour l'approvisionnement en eau là où il n'y a pas de réseau. Dans ce chapitre nous présenterons tous les composants qui composent le système de pompe photovoltaïque à savoir. Générateur photovoltaïque et groupe électropompe Ce chapitre abordera plus en détail les éléments théoriques qui permettent de déterminer la Taille actuelle de la station de pompage. Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement accentués dans zones désertiques et semi-désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides et semi-arides est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage solaire photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau Plusieurs travaux sur le dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque (SPPV) ont été publiés Ces travaux se basent sur la simulation du fonctionnement de chaque. Composante de ces SPPV. Cependant ces programmes nécessitent des données expérimentales qui ne sont pas faciles à obtenir.

2.2. Le pompage solaire :

Pour pomper l'eau avec un système photovoltaïque, deux méthodes sont possibles.

2.2.1. Pompage au fil du soleil :

Le pompage « au fil du soleil » permet d'avoir un système photovoltaïque simple, fiable et moins coûteux. Ici l'eau est pompée et stockée dans un réservoir, au fil de la journée. On parle alors d'un stockage hydraulique. L'eau stockée sera distribuée au besoin [16].

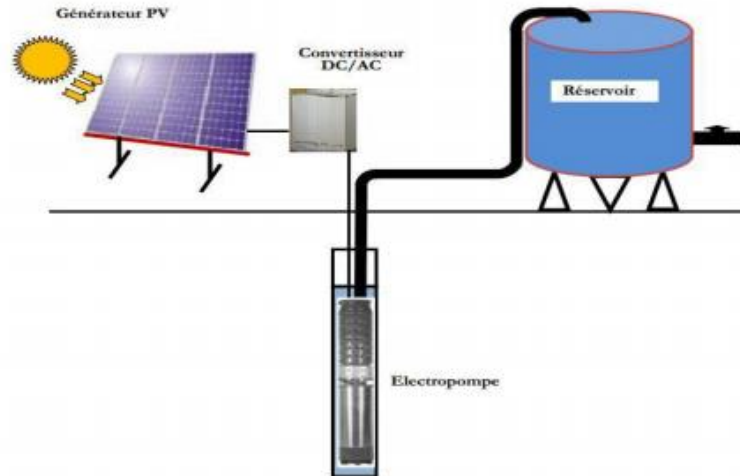


Figure 2.1: Pompage photovoltaïque au fil du soleil [14].

2.2.2. Pompage avec batteries :

La méthode de pompage d'eau en utilisant l'énergie stockée sur des batteries peut avoir l'avantage de garantir une stabilité d'alimentation des équipements (système présente l'avantage d'un débit régulier, la possibilité de pomper lorsque le soleil est absent). L'énergie emmagasinée peut être utilisée aussi pour d'autres besoins ultérieurs. L'inconvénient majeur, voire handicapant, de cette technique est qu'elle comporte plusieurs composants qui influent négativement sur la fiabilité et le coût global du système. En effet, les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent, en outre, un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30 % de la production d'énergie [17].

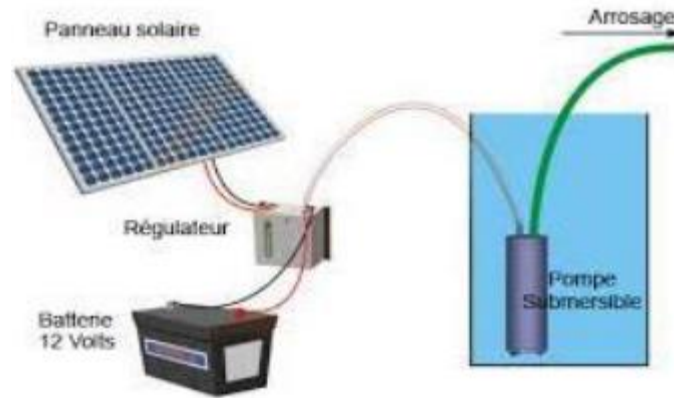


Figure 2.2 : Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie [15].

2.3. Les Composants d'un système de pompage PV :

Un système de pompage solaire est généralement constitué de

- Le générateur photovoltaïque
- Le groupe de motopompe.
- L'électronique décommande.
- Les éléments du stockage [18].

2.3.1. Le générateur photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque est constitué de modules d'un générateur de charge-décharge et d'une batterie d'accumulateur. Il produit du courant continu qui peut être converti si nécessaire en courant alternatif à l'aide d'un onduleur. Généralement, un système solaire photovoltaïque comprend une batterie d'accumulateurs stocke l'énergie électrique produite pour pouvoir la restituer à tout moment, un régulateur de charge-décharge protège la batterie contre les surcharges et décharges profondes, un convertisseur d'énergie et enfin les récepteurs ou applications. Modules photovoltaïques interconnectés en une seule unité de génération d'électricité montés sur des structures diverses (support ou châssis, toits et autres) [19].

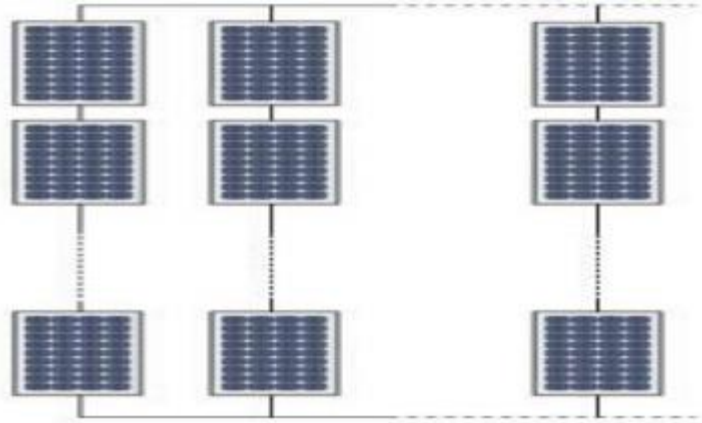


Figure 2.3: Champ photovoltaïques [19].

2.3.2. Le groupe de motopompe :

La classification des pompes peut se faire selon différents critères conception de la pompe sa position dans le système et le type du moteur utilisé [20].

Conception de la pompe	Position dans le system	Type de moteur
Centrifuge	Surface	Courant continu
Volumétrique	Immerge	Courant alternative

Tableau 1.1: Classification des pompes.

2.4. Classification selon la conception de la pompe:

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide Il existe deux types de pompes les pompes centrifuges et les pompes volumétrique.

2.4.1. Les pompes :

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Autre ces deux classifications que nous décrivons plus loin, nous distinguons également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompé ; la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

La hauteur d'aspiration de n'importe qu'elle pompe est limitée à une valeur théorique de 9.8 mètre (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres.

Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.

Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur.

2.4.1.1. Pompe centrifuge :

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse.

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faibles ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.
- la puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global.

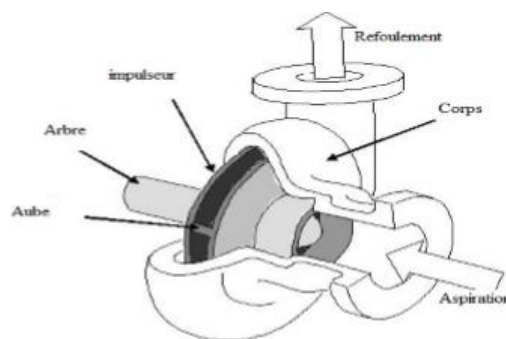


Figure 2.11 : Pompe centrifuge [18].

➤ **Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse**

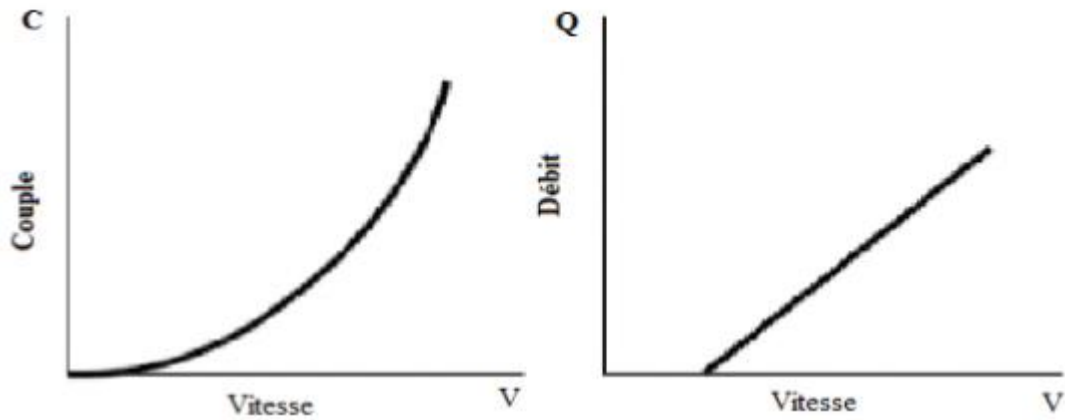


Figure 2.12 : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.

2.4.1.2. Pompes volumétriques :

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.)

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m³/h) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.

Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique $I=f(V)$ de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable.

Pour pallier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système [19].



Figure 2.13 : Pompe volumétrique [19].

➤ **Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse**

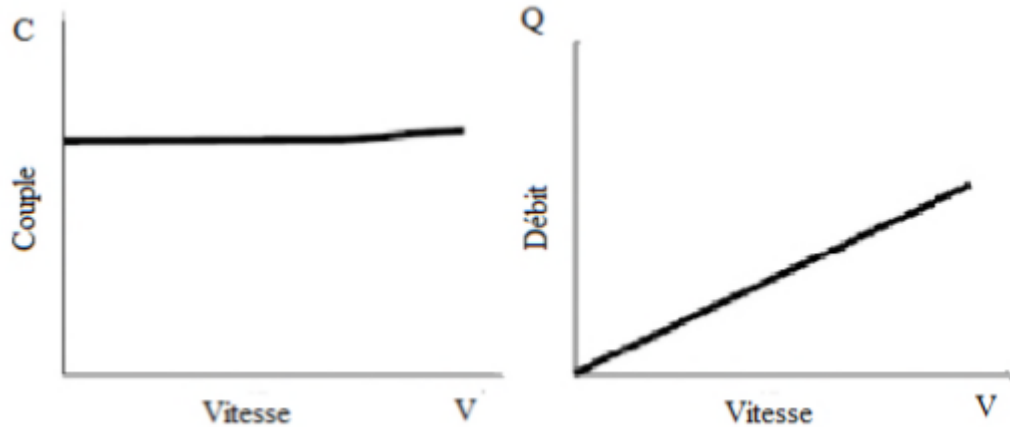


Figure 2.13 : Caractéristiques d'une pompe volumétrique [19].

2.5. Classification selon la position de pompe :

En fonction de l'emplacement physique de la pompe, nous distinguons Les pompes de surface et les pompes immergée [18].

2.5.1 Pompes de surface :

Le terme surface définit la position d'une pompe par rapport au liquide à pomper. Elle est dite pompe de surface car prévue pour être posée en dehors du liquide à aspirer.

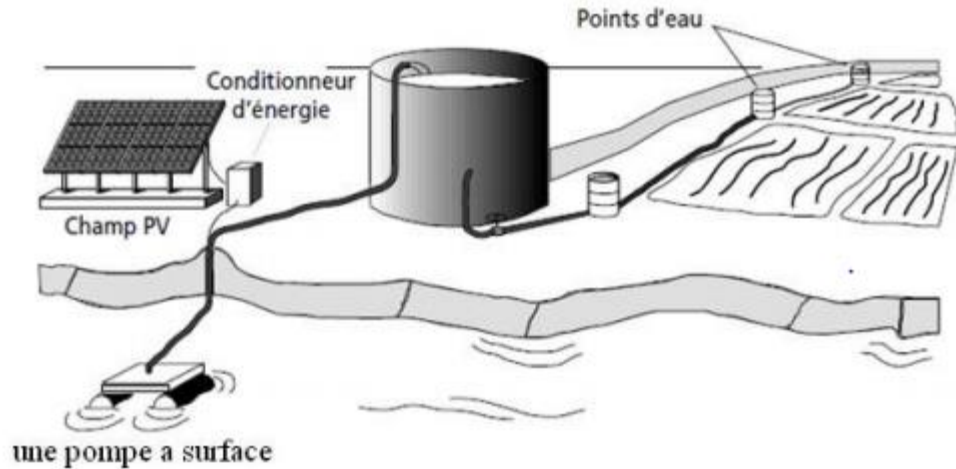


Figure 2.6: Pompes de surface [18].

2.5.2. Pompes immergées :

Les pompes de refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc) soit le moteur en surface. La transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres selon la puissance du moteur.

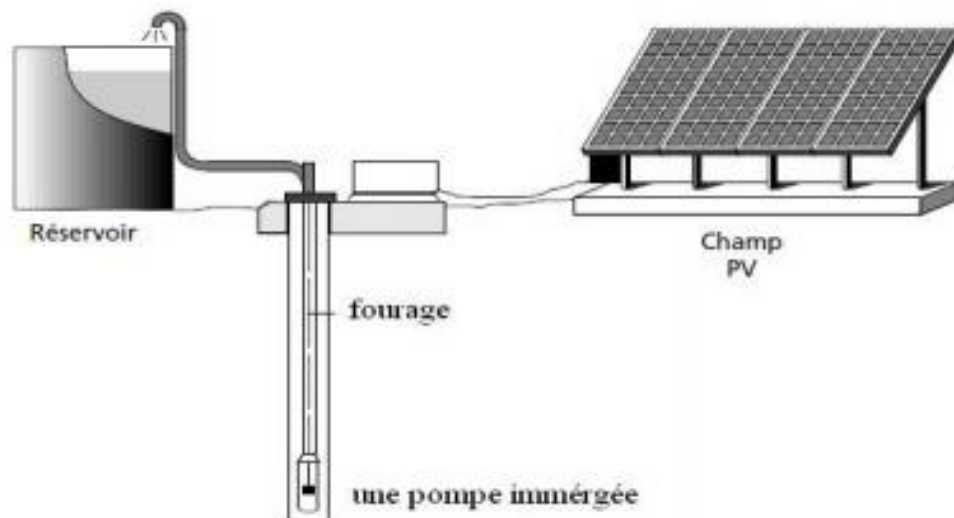


Figure 2.7: Pompe immergée [18].

2.6. Classification selon le moteur utilisé :

Un moteur électrique est un dispositif électromécanique permettant la conversion l'énergie électrique en énergie mécanique. Il existe deux types de moteurs à courant continu et alternatif [18].

2.6.1. Moteurs :

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais nous allons voir que l'évolution des convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout, moins cher [13].

2.6.1.1. Moteur à courant continu :

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation. Son principal défaut réside dans l'ensemble balais/ collecteur rotatif qui s'use, est complexe à réaliser et consomme de l'énergie [21].

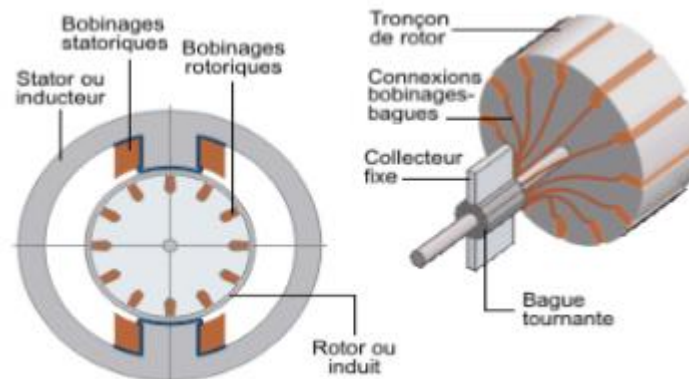


Figure 2.8 : Moteur à courant continu [21].

2.6.1.2 Moteur à courant alternatif [21]:

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilos Watts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de 120°) utilisé par les distributeurs d'électricité.

Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- Les moteurs synchrones ;
- Les moteurs asynchrones ;

a. Les moteurs synchrones :

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors « alternateur ». Mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1 500 MW.

Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

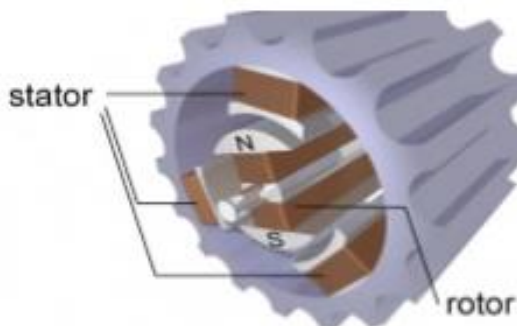


Figure 2.9 : Moteur synchrone [21].

b. Les moteurs asynchrones :

La machine asynchrone, connue également sous le terme d'origine anglo-saxonne de « machine à induction », est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme anglais provient des courants induits dans le rotor par induction

magnétique. Le terme « asynchrone » provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. [21]

L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé), plus robuste moins cher et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïques. [22]

L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur. [22]

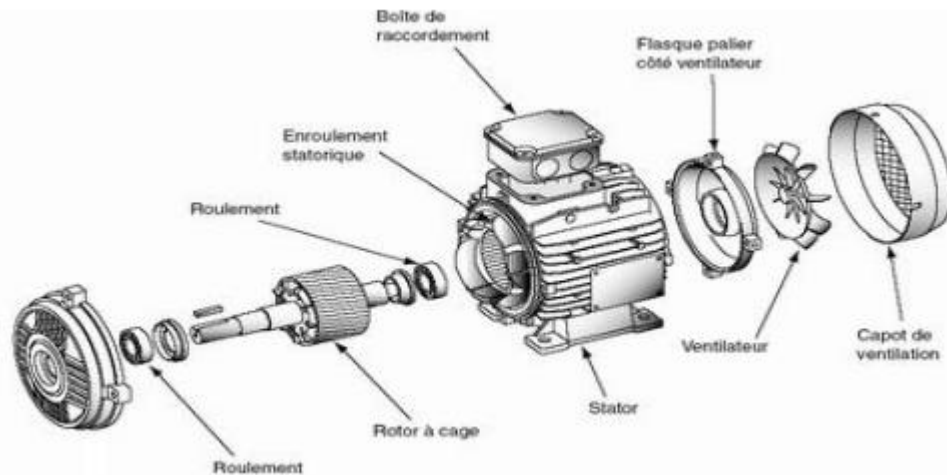


Figure 2.10 : Moteur asynchrone [21].

2.7. L'électronique de commande et de contrôle

2.7.1. Le convertisseur DC/AC (onduleur)

Les convertisseurs ont été spécialement conçus pour une utilisation en fonction des spécifications d'un système de pompage électrique alimenté par un générateur photovoltaïque. Ces spécifications s'affranchissent des besoins de batteries de stockage et de régulateur de charge. Le convertisseur transforme le courant continu produit par les panneaux en un signal alternatif permettant de faire tourner le moteur de la pompe.

La vitesse de rotation du moteur dépend de la tension, donc de l'ensoleillement. Ce convertisseur assure également les fonctions de commande, de contrôle et de protection du système de pompage. La puissance électrique d'un générateur solaire n'est pas constante et dépend de l'ensoleillement et de la température des cellules photovoltaïques. Dès que la puissance est suffisante l'onduleur se met automatiquement en marche lorsque la puissance est trop faible, il se déconnecte automatiquement.



Figure 2.11: onduleur (SPA CONDOR ELECTRONIQUE) [21].

2.7.2. La partie stockage

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons: stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. Aussi, le système de stockage avec batterie génère un coût additionnel, des problèmes de maintenance de la batterie et de l'obligation de la remplacer après 3 à 5ans d'usage. De plus, le rendement énergétique est meilleur quand il n'y a pas d'accumulateurs. Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement [23].

2.8. Conclusion

Dans ce chapitre, deux techniques de pompage PV ont été présentées : pompage au fil de soleil et pompage avec batterie. Nous avons montré l'intérêt du pompage dit « au fil du soleil ». Nous avons également pu conclure que les systèmes de pompage photovoltaïque les plus courants, selon l'état de l'art actuel, sont constitués d'une pompe centrifuge menée d'un moteur à induction triphasé. Le moteur est alimenté par un générateur photovoltaïque sans batteries, via un onduleur triphasé à fréquence variable conçu spécifiquement pour cette application.

Chapitre III :

Dimensionnement du système de pompage

pv

3.1.Introduction

La réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome, fiable et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier dans les régions sahariennes et isolées. En effet, un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est facile à installer avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service.

Dans ce chapitre nous traitons principalement les éléments nécessaires qui permettent à la réalisation d'une station de pompage solaire sans oublier le dimensionnement de ces derniers et de faire les bons choix de matériels tant en quantité qu'en qualité.

Notre exemple pratique sera dans une région de la wilaya de Mostaganem où nous allons dimensionner le système Photovoltaïque de pompage autonome au fil du soleil.

3.2.Méthode de dimensionnement

Le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque concerne essentiellement le calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque, le choix de la pompe et le choix du contrôleur répondants au service requis dans les conditions de référence. La démarche analytique adoptée dans le cadre de notre étude s'articule autour de quatre étapes suivantes [24] [25] :

- Besoins journaliers en eau.
- Dimensionnement et choix de la pompe.
- Energie solaire disponible et dimensionnement du champ photovoltaïque.
- Choix des composants.

Cette étude permet de déterminer et de faire le choix des différents composants : Le panneau solaire, la pompe, les batteries et le convertisseur d'une station de pompage solaire au fil du soleil.

3.3. Besoins journaliers en eau

Quantité d'eau ou besoin journalier est définie par l'agriculteur ou l'intéressé. Elle s'exprime en m³/ jour.

3.4. Dimensionnement et choix de la pompe

Données nécessaires pour dimensionner la pompe solaire et ses composants :

- Débit horaire de la pompe en l/h / Quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné.

En pompage, le débit est habituellement donné en litres par heure (l/h). En pompage solaire, le débit (ou le besoin en eau) est souvent exprimé en m³ par jour.

- Hauteur manométrique totale.

La hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement.

- capacité de stockage.

Le réservoir sert non seulement à stocker de l'eau mais il constitue aussi un régulateur de débit. Ainsi, la capacité utile du réservoir sera déterminée pour qu'elle puisse permettre de stocker les excédents de pompage pendant les heures de faibles consommations et de compenser le déficit entre le pompage et la consommation [25].

Schéma de principe

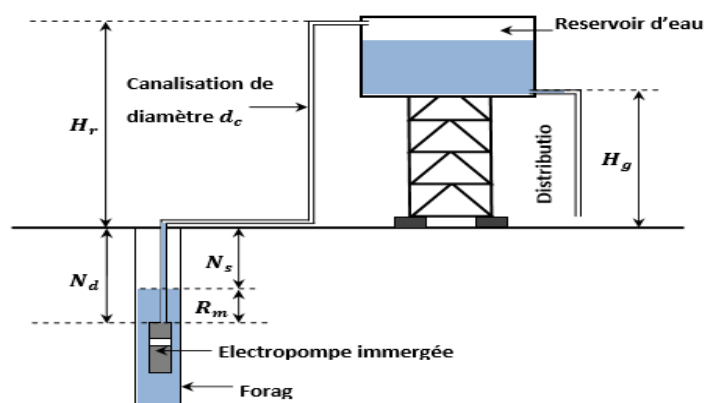


Figure 3.1. Système de pompage d'eau avec stockage [05].

Tableau 3.1. Désignation des paramètres du système de pompage.

Symbole	Désignation	Unité
H_r	Hauteur géométrique du sol au plan du haut du réservoir	m
H_g	Hauteur géométrique du sol au plan du bas du réservoir	m
N_s	Niveau de la nappe statique (au repos)	m
N_d	Niveau dynamique de la nappe (pour un débit moyen)	m
R_m	Rabattement maximal avant d'arrêter la pompe N_d-N_s	m

3.4.1. Détermination du débit horaire de la pompe Q_p en (m^3/h)

Pour estimer le débit maximal de la pompe, on prend approximativement la valeur de la demande journalière de pointe qu'on divise par le nombre heures d'ensoleillement maximal. Le débit horaire de la pompe est calculé de la manière suivante [26] :

$$Q_p = \frac{D_{JP}}{H_i} \quad (01)$$

H_i : Nombre d'heures d'ensoleillement.

3.4.2. Calcul du rabattement

Le rabattement est la différence entre le niveau dynamique et le niveau statique.

Pour déterminer le rabattement du forage à nappe libre, nous avons utilisé la formule de Jules Dibuït et la formule empirique de Sichardt [27].

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (02)$$

$$R = 3000(H - h)\sqrt{K} \quad (03)$$

$$\text{Donc } h = H - \frac{R}{3000\sqrt{K}} \quad (04)$$

En remplaçant l'équation 14 dans l'équation 12 on a :

$$Q \ln \left(\frac{R}{r} \right) = \frac{2\pi KHR}{3000\sqrt{K}} - \frac{\pi R^2}{3000^2} \quad (05)$$

H : Hauteur de la partie saturée en (m).

Q : Débit de pompage en (m³/s).

K : Perméabilité du sol en m/s (la couche de roche rencontrée au niveau de la crépine de forage est l'argile qui a une perméabilité K= 10⁻¹¹ cm /s).

r : Rayon du forage.

R : Rayon d'action ou d'influence du cône de dépression en (m).

h : Hauteur d'eau dans le forage pendant le pompage en (m).

L'épaisseur de la partie saturée (H) est la différence entre la profondeur (H₁) du forage et le niveau statique (NS).

$$H = H_1 - NS$$

Avec :

H₁ : Profondeur totale du forage en (m).

Ns : Niveau statique en (m).

3.4.3. Conduite de refoulement

Le choix du diamètre de la conduite de refoulement est déterminé par la formule de

Bresse [28]. Qui s'écrit

$$D = 24.23\sqrt{Q} \quad (06)$$

Avec

Q : Débit de pompage en (l/s).

D : Diamètre de la conduite en (mm) [14].

3.4.4. Perte de charge totale et la HMT

$$HMT = H_r + N_d + P_T \quad (07)$$

$$P_T = P_l + P_s \quad (08)$$

Où

P_T : Pertes de charges totales.

P_l : Pertes de charge linéaire.

P_s : Pertes de charge singulières.

Calcul de perte de charge linéaire par la formule de Darcy-Weibach (1857) :

$$P_l = \lambda \frac{LV^2}{D2g} \quad (09)$$

Avec :

λ : Coefficient de perte de charge dépend du nombre de Reynolds (Re)[08][16]:

L : Longueur de la conduite de refoulement en (m).

V : la vitesse de découlement en (m/s).

D : Diamètre de la conduite en (m).

g : Constante gravitationnelle (m/s²).

Calcul des pertes de charge singulières P_s.

$$P_s = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

Avec : ζ la somme des coefficients de singularité.

3.4.5. Calcul de la hauteur d'élévation requise pour la motopompe

L'élévation est plus ou moins importante selon la configuration de l'installation ou l'application (épuisement, aspersion, irrigation, vidange, lavage). Son calcul est réalisé à partir de [13] :

Hauteur d'élévation = hauteur d'aspiration + hauteur de refoulement + perte de charge

3.5. Calcul de l'énergie électrique nécessaire par jour

L'énergie électrique journalière nécessaire E_{elec} en (kWh/j) pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée par la formule suivante [25] [24] :

$$E_{elec} = \frac{C_h \times Q_p \times HMT}{\eta_G} \quad (11)$$

η_G : Rendement du groupe de pompage :

$$\eta_G = \eta_{moteur} \times \eta_{pompe} \quad (12)$$

$C_h = 2.725$: Constante hydraulique, cette constante hydraulique dépend de la gravité et de la densité de l'eau.

Q_p : Débit horaire de la pompe en (m³/h).

HMT : Hauteur manométrique totale de la pompe.

3.6. Énergie solaire disponible et dimensionnement du champ photovoltaïque

3.6.1. Énergie solaire disponible

Selon les données du premier chapitre on a détaillé plusieurs sites officiels de la carte d'enseillement de l'Algérie.

Pour la région de Mostaganem où on va installer notre système, nous a donné un enseillement moyen de 4.5KW/m²/j [31].

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, C'est à ce mois que le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire est minimum [08].

3.6.2. Dimensionnement du champ photovoltaïque

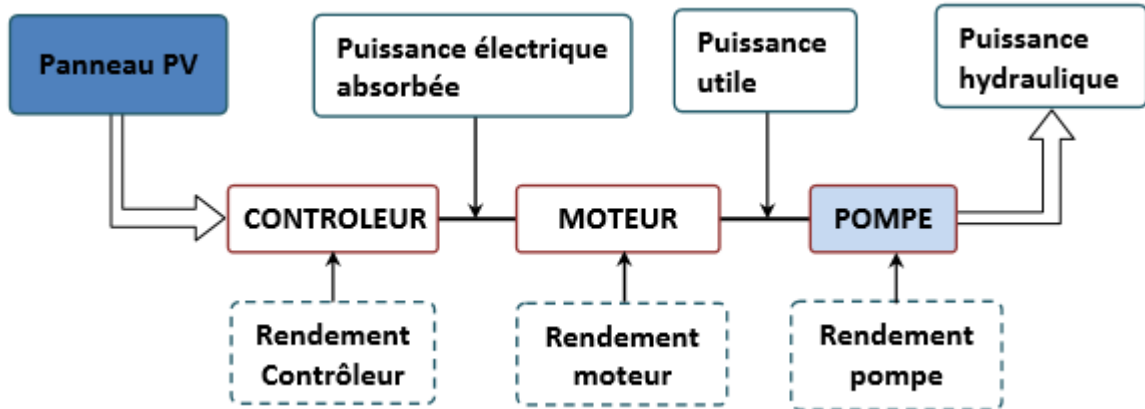


Figure 3.2 : Chaîne de conversion d'un pompage PV au fil du soleil.

3.6.2.1. Calcul de la puissance crête P_{cr}

L'énergie fournie par les panneaux solaires en une journée doit être égale à l'énergie journalière consommée par la pompe [25] [32].

La puissance crête se calcule en fonction de trois facteurs :

- L'énergie électrique calculée selon les besoin de notre système E_{elec} .
- Le facteur de correction $F_c = 0.6a0.8$
- L'ensoleillement moyen du site d'installation E_{ns} .

$$P_{Cr} = \frac{E_{elec}}{F_c \times E_{ns}} \quad (13)$$

3.6.2.2. Tension du système

Comme on a expliqué dans le chapitre précédent la tension de système se détermine par un tableau des intervalles comme suit :

Tableau 3.2 : Tension de système photovoltaïque selon la puissance crête.

Puissance de champ	0-500w	500w- 2Kw	2Kw - 10 Kw	plus de 10Kw
Tension de système	12V	24V	48V	96V

3.6.2.3. Calcul de nombre de panneaux solaire

$$N_{bp} = \frac{P_{Cr}}{P_p} \quad (14)$$

Nombre de panneaux en série :

$$N_{bps} = \frac{V_{sys}}{V_{mp}} \quad (15)$$

Nombre de panneaux en parallèle :

$$N_{bpps} = \frac{N_{bp}}{N_{bps}} \quad (16)$$

Avec :

N_{bp} : Le nombre total des panneaux.

P_{Cr} : La puissance crête de système.

P_p : La puissance du panneau.

V_{sys} : Tension de système.

V_{mp} : Tension nominal d'un panneau.

3.7. Critères de Choix de type de pompes

La pompe est choisie en fonction des caractéristiques du circuit de circulation et du débit de liquide dans ce circuit.

Pour traduire numériquement les caractéristiques d'un circuit, on calcule sa hauteur manométrique totale (HMT) [33].

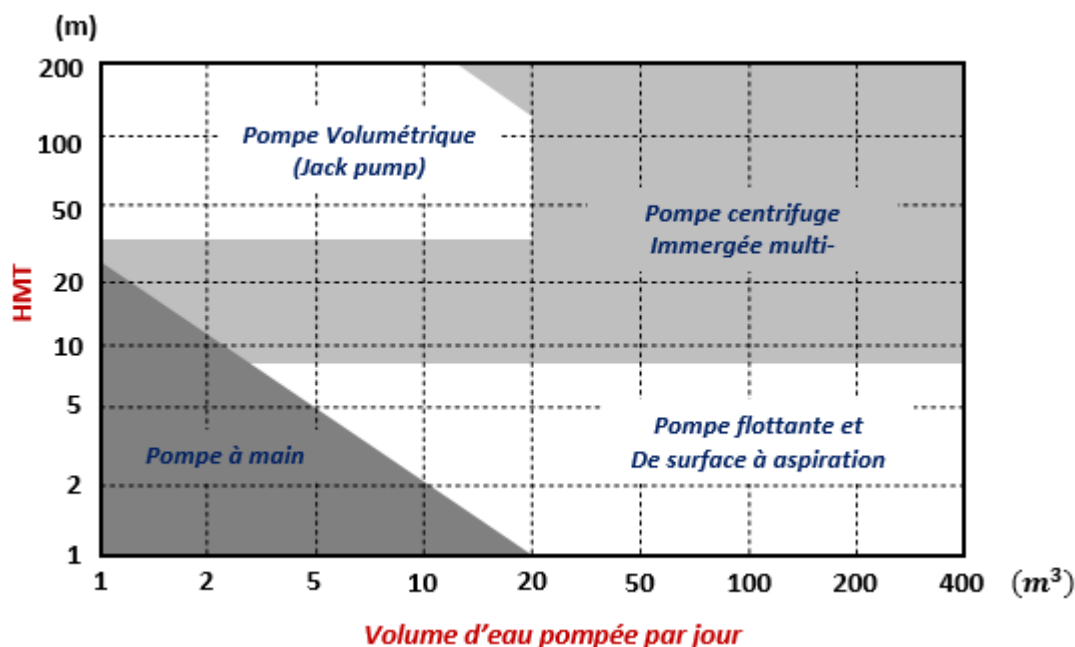


Figure 3.4 : Critère de choix de pompe selon besoin journalier et Hmt.

Tous les liquides à pomper n'ont pas les mêmes caractéristiques, les pompes soient immergées soient des motopompes répondent à des applications multiples selon :

- **La qualité de l'eau :** eaux claires et peu chargées ou eaux chargées.
- **Le débit et la pression :** nécessaires en fonction des pertes de charge.

Pour les motopompes nous avons trois étapes essentielles pour bien choisir :

- **La hauteur d'aspiration**

C'est la hauteur entre le niveau d'eau pompée et l'axe de la pompe. Pour des raisons physiques, elle ne peut dépasser 8 mètres au-dessus du niveau de la mer.

- **La hauteur de refoulement**

C'est la hauteur entre l'axe de la pompe et le point le plus haut du réseau.

- **La perte de charge**

Il s'agit de la résistance rencontrée par l'eau dans les tuyaux.

Elle se calcule en fonction de la longueur, du diamètre, de la qualité des tuyaux, de leur forme et du nombre d'accessoires (on prendra 20 % pour les cas généraux).

3.8. Dimensionnement des batteries

3.8.1. Capacité totale de batteries

La capacité totale des batteries peut être approchée par la formule suivante [34] :

$$C_{TBatt} = \frac{E_{elec} \times N_A}{V_{sys} \times D_P} \quad (17)$$

Avec :

N_A : Nombre de jours d'autonomie.

D_P : La profondeur de décharge maximale acceptable pour la batterie.

3.8.2. Nombre total de batteries

Le nombre total de batteries se calcule de la manière suivante :

$$N_{Tbatt} = \frac{P_{cr}}{C_{TBatt}} \quad (18)$$

Avec :

N_{Tbatt} : Nombre totale de batteries.

P_{cr} : Puissance crête du système.

3.8.3. Nombre de batteries en série et en parallèle

$$N_{batt_s} = \frac{V_{sys}}{V_{batt}} \quad (19)$$

$$N_{batt_p} = \frac{N_{Tbatt}}{N_{batt_s}} \quad (20)$$

Avec :

N_{batt_s} : Nombre de batterie en série.

N_{batt_p} : Nombre de batteries en parallèle.

V_{sys} : Tension du système.

V_{batt} : Tension de la batterie.

3.9. Régulateur de charge

Le régulateur de charge assure plusieurs fonctions :

- limitation de la tension pour éviter les surcharges.
- Limitation de la décharge par délestage de l'utilisation, pour éviter les décharges trop profondes risquant d'endommager la batterie.
- Contrôle du fonctionnement du système par voyant ou affichage LCD. Il doit être installé au plus près de la batterie pour limiter la longueur des câbles et donc les pertes d'énergies. il est préférable de choisir un emplacement sec et ventilé.

Le contrôleur de charge sera dimensionné à partir de paramètres suivants :

- U_{reg} : Tension de contrôleur qui est égale à la tension de système.
- I_{reg} : Courant de contrôleur qui représente le courant total des panneaux.
- U_{fonct} : Plage de Tension d'entrée ou de fonctionnement de contrôleur. Il doit contenir la tension totale des panneaux solaire.

3.10. Section du câble

La section de câble de la partie continue, se calcule par la façon suivante :

La relation de la loi d'Ohm :

$$\Delta V(V) = R \times I \quad \text{Ou} \quad R = \frac{2 \times \rho \times L}{S}$$

$$\text{Or} \quad \Delta V(V) \leq \Delta V_L(\%) \times U(V) \tag{21}$$

Donc

$$\frac{2 \times \rho \times L}{S} \leq \Delta V_L(\%) \times U(V)$$

$$S \geq \frac{2 \times \rho \times L \times I}{\Delta V_L(\%) \times U(V)} \tag{22}$$

Avec :

R : résistance totale du câble (Ω)

L(m) : longueur du câble.

S : section (mm^2) du conducteur.

ρ : Résistivité du cuivre.

ΔV (%) : Chute de tension limite.

La chute de tension maximale admissible exigée par la norme UTEC15-712 relative aux installations ne doit pas excéder 3% de la tension nominale dans la partie DC [24].

U(V) : Tension à puissance maximale du générateur PV obtenu dans les conditions (STC).

I (A) : Courant à puissance maximale générateur PV obtenu dans les conditions (STC).

$I = I_{mp} \times \text{nombre de branche en parallèle}$

Le tableau suivant donne la section des conducteurs cuivre en fonction de l'intensité maximale que le conducteur peut supporter [24].

Tableau 3.3 : Section nominale des câbles.

$S(\text{mm}^2)$	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300
$I_{mp}(\text{A})$	13	21	28	35	46	61	81	99	125	160	195	220	250	285	340	395

3.11. Conclusion Générale

Dans ce chapitre nous avons appris comment faire un dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome avec toutes les étapes nécessaires, qui sont entre autres :

- Besoins journaliers en eau.
- Dimensionnement et choix de la pompe.
- Débit horaire de la pompe.
- Calcul de l'énergie électrique nécessaire par jour.
- Energie solaire disponible et dimensionnement du champ photovoltaïque.
- Choix des composants.

Le dimensionnement de ces composants s'avère indispensable pour la suite de notre travail, et le chapitre suivant fera l'objet des applications numériques de tous ces éléments précités.

Chapitre IV :
Dimensionnement par PVsyst

4.1.Introduction

PVsyst est un progiciel PC utilisé dans le monde entier pour l'étude, le dimensionnement, la simulation et l'analyse des données d'un système photovoltaïque solaire complet. De nombreuses décisions financières sont prises sur la base du rapport de simulation fourni en sortie par le logiciel.

Dans ce chapitre sera dimensionner le system a l'aide de PVsyst programme.

4.2.Dimensionnement de la system

Lorsque vous ouvrez PVsyst programme, cette interface apparaît avec ses trois options (Priliminary design, Project design, Tools)

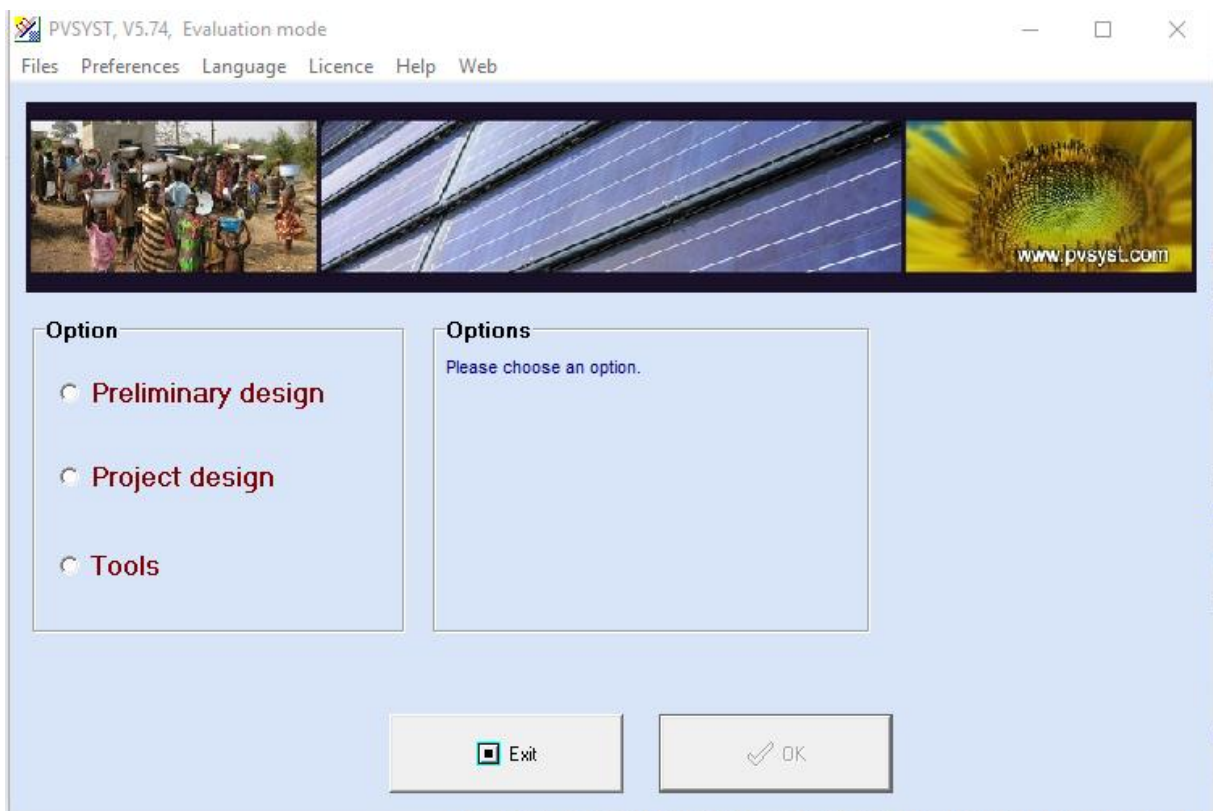


Figure 4.1 : Etape 1 PVsyst

Nous choisissons Project design puis pumping :

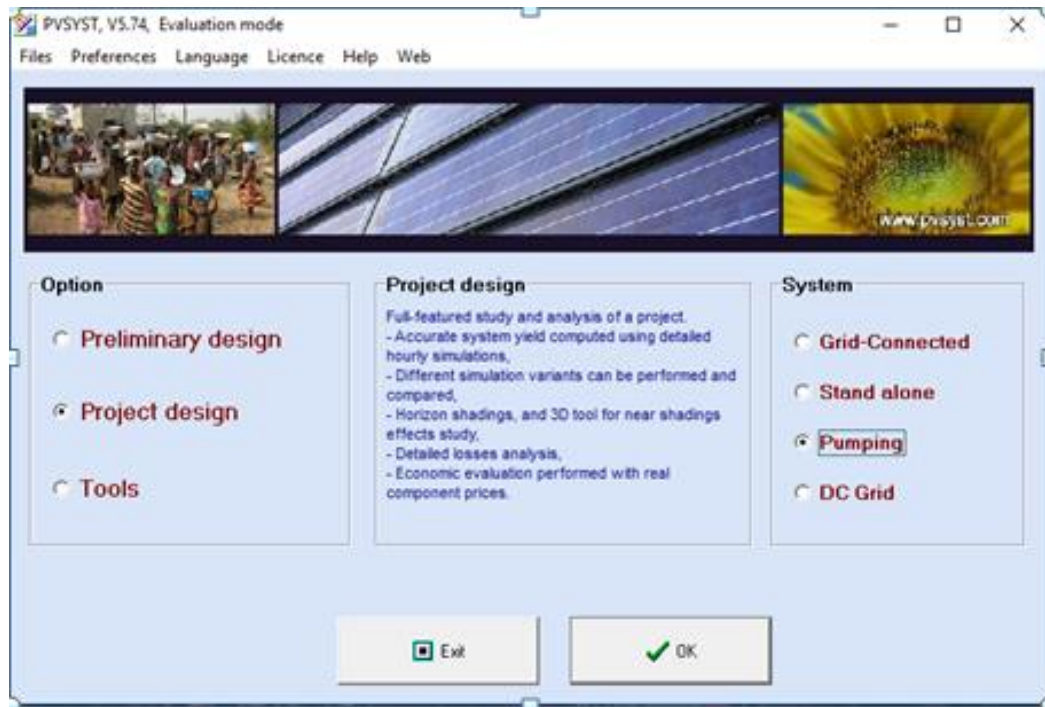


Figure 4.2 : Etape 2 PVsyst

Puis Project pour saisir les informations sur le projet et le site :

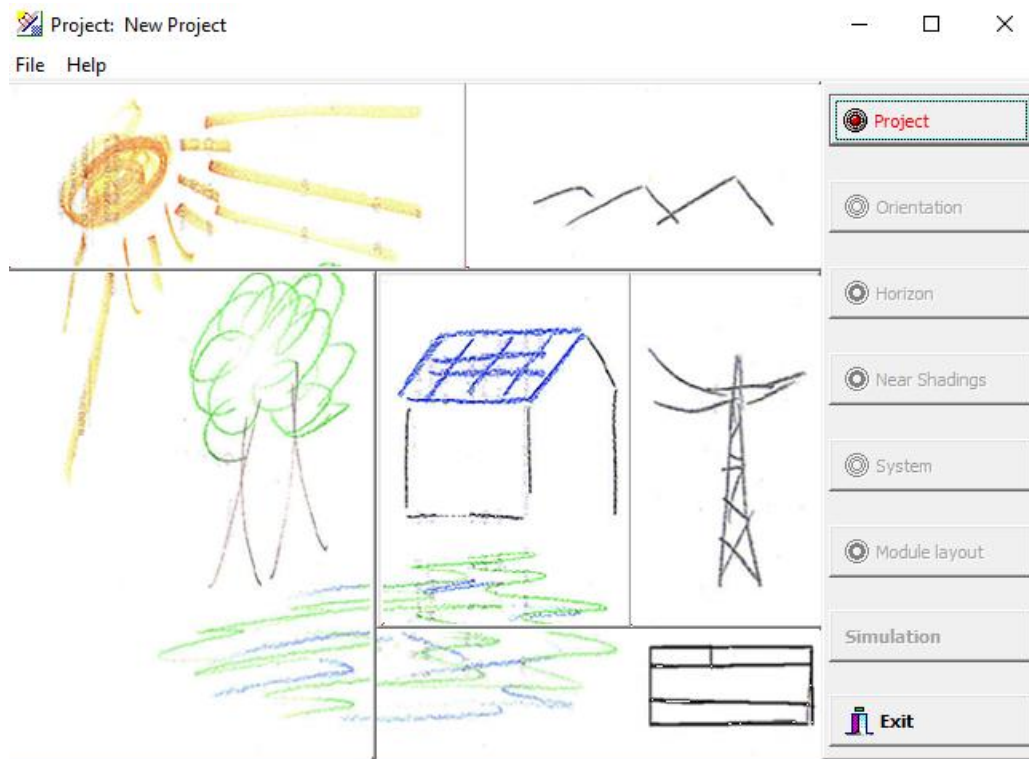


Figure 4.3 : Etape 3 PVsyst

Après avoir saisi les informations client, nous passons à Site and Meteo

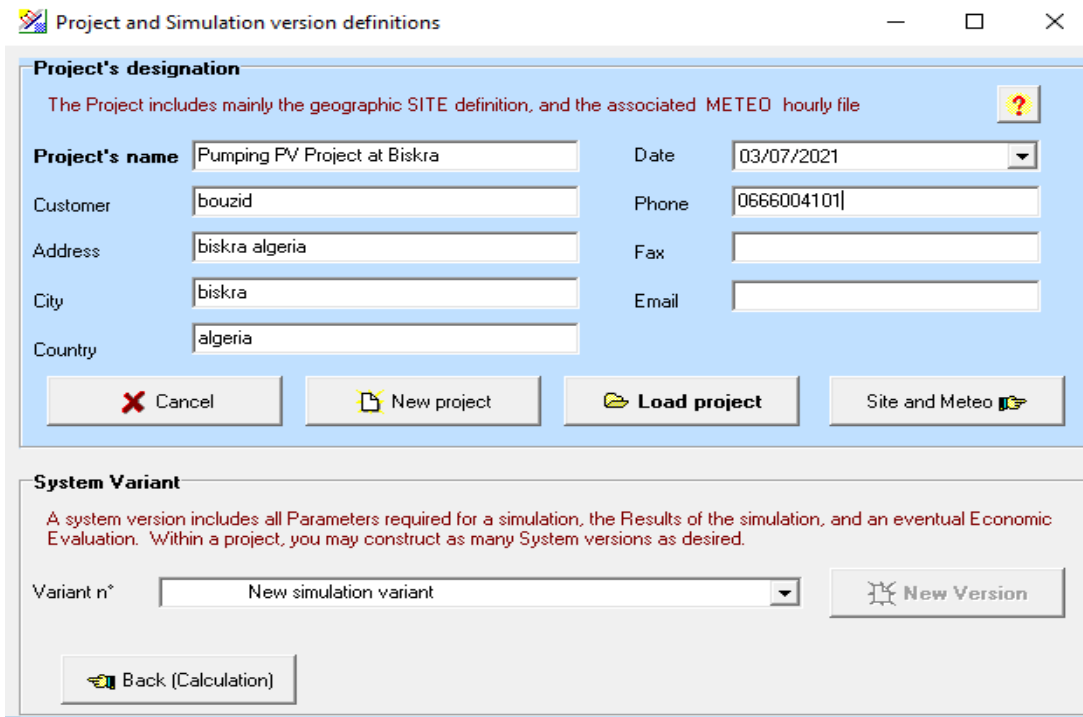


Figure 4.4 : Etape 4 PVsyst

Après avoir sélectionné la zone sur laquelle vous souhaitez travailler, appuyez sur Next

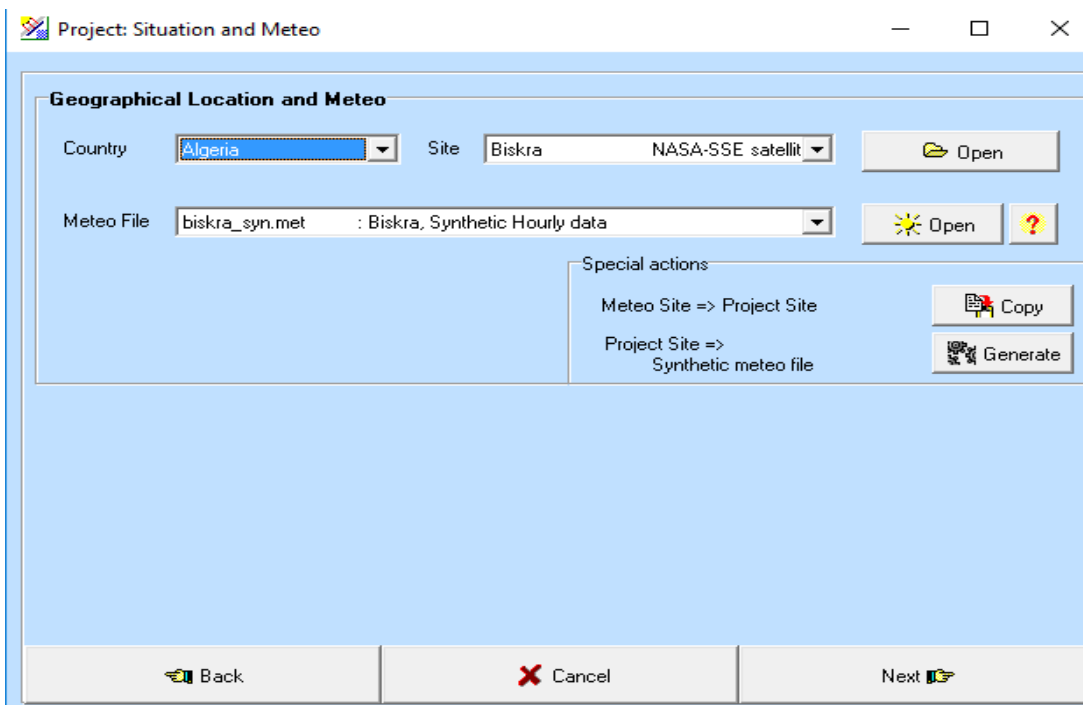


Figure 4.5 : Etape 5 PVsyst

Pour retourner le programme à la première interface, nous cliquons ensuite sur le bouton « Orientation » pour choisir le degré d'inclinaison et la direction des panneaux solaires idéaux :

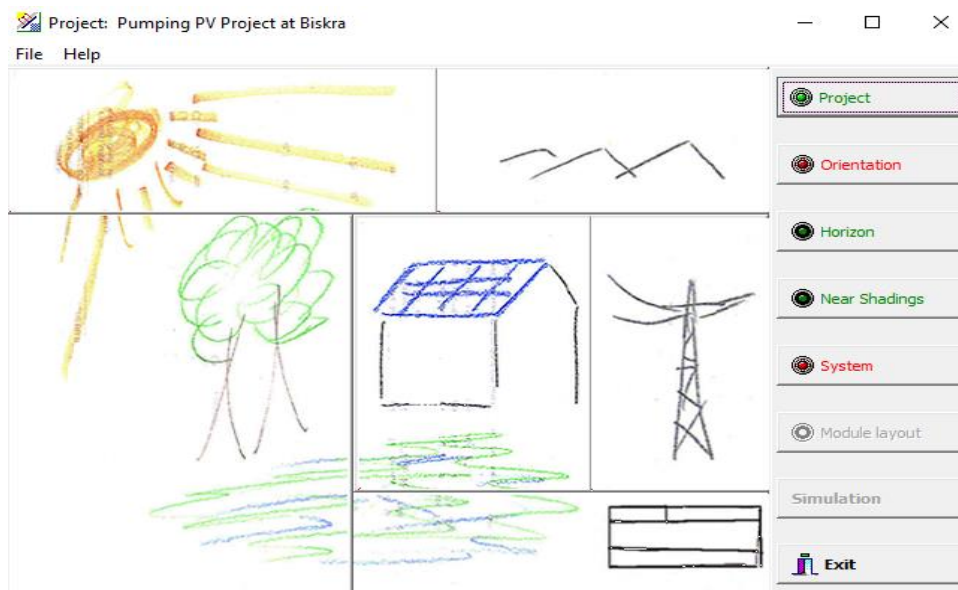


Figure 4.6 : Etape 6 PVsyst

nous choisissons « Yearly irradiation yield » puis le degré d'inclinaison des panneaux pour « Loss By Respect To Optimum » égales à 0.0% , on click «OK» :

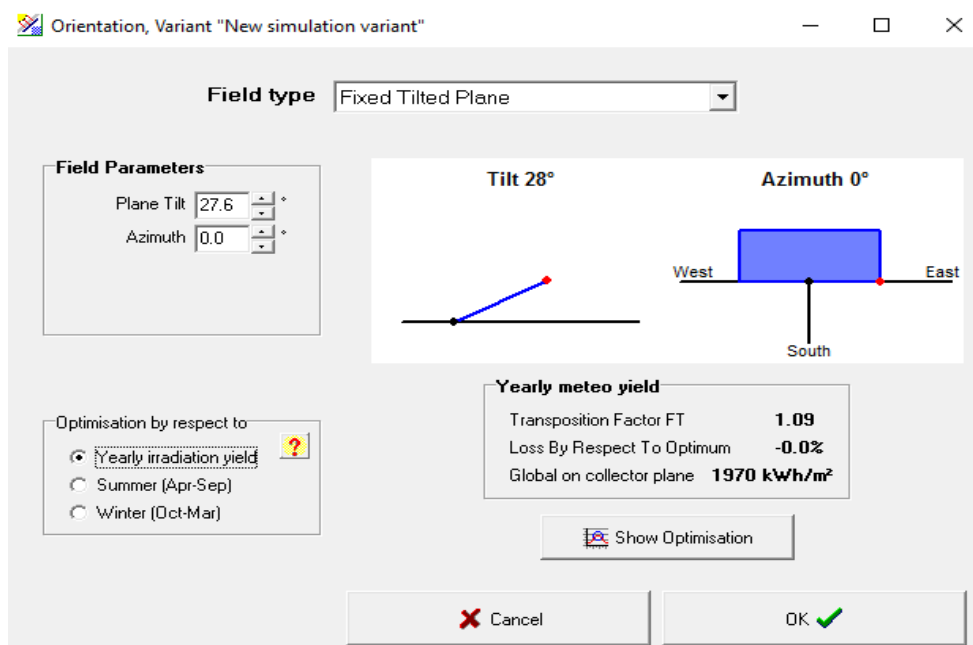


Figure 4.7 : Etape 7 PVsyst

Maintenant, nous cliquons sur «System» pour choisir les besoins et les composants nécessaires du système :

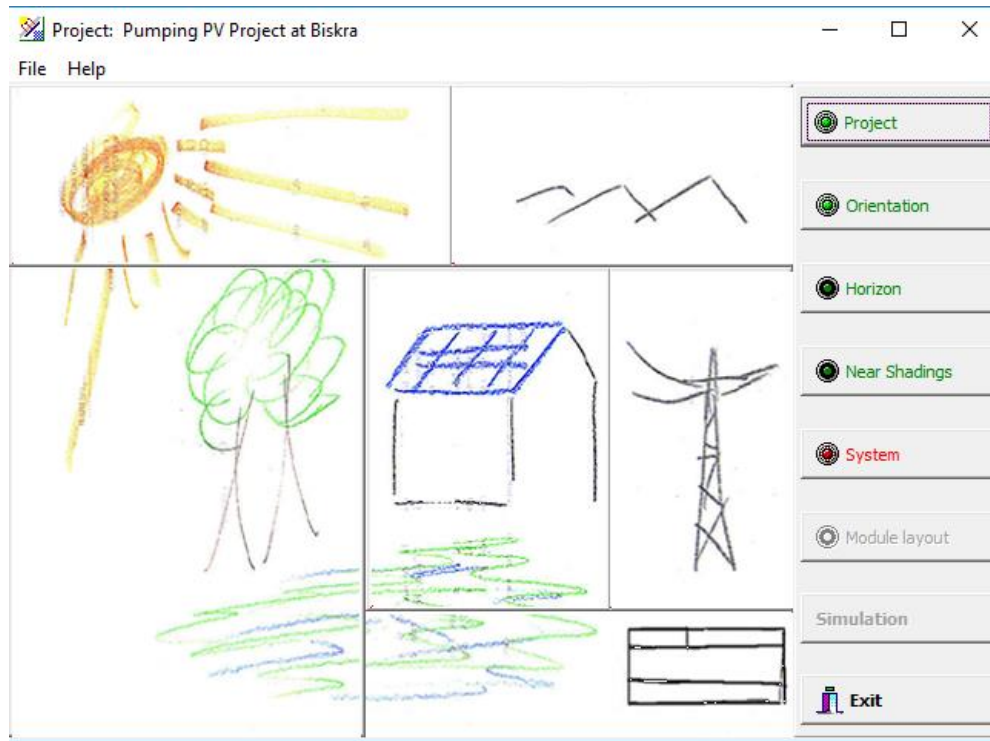


Figure 4.7 : Etape 7 PVsyst

Commençons par le système de pompage et de tuyauterie

Nous choisissons le type de système de pompage «[Deep Well to Storage]» et remplissons ensuite les blancs selon les exigences du client , on click on «Water needs» Pour déterminer les besoins en eau :

Pumping Hydraulic Circuit Definition

Pumping System Type Deep Well to Storage

Well characteristics		Storage Tank	
Static depth	147.0 m	Volume	18.0 m ³
Max. pumping depth	149.0 m	Diameter	3.39 m
Pump depth	150.0 m	Water full height	1.99 m
Borehole diameter	50.0 cm	Feeding altitude	1.00 m
Spec. drawdown	0.00 m/m ³ /h	<input type="checkbox"/> Bottom alimentation	

Hydraulic Circuit

Pipe choice PE32 (1"1/4)

Piping length 154 m

Number of elbows 4

Other friction losses 0.00

Head [meter/W]

Flowrate [m³/h]

— Total with friction loss

— Diff. altitude OUT-IN

Back Cancel Water needs

Figure 4.8 : Etape 8 PVsyst

Et nous le remplissons également selon les exigences du client , on click on «47System definition » :

Water Needs and Hydraulic Pressure / Head, Variant "New User's needs"

Comment: New User's needs

Water needs

- Yearly average
- Seasonally value
- Monthly values

Whole Year needs : 30.0 m³/day

Water units

Flow: m³/day

Pressure: meterW

Yearly summary

Water needs average	30.0 m ³ /day
Yearly water needs	10950 m ³
Yearly Head average	148 meterW
Hydraulic energy	4416 kWh
PV needs (very roughly)	14914 kWh

Well static depth variations

- Yearly constant
- Seasonal values
- Monthly values

Whole Year: 147.0 meterW

Model File

Load Save

Hydraulic configuration Cancel System definition

Figure 4.9 : Etape 9 PVsyst

Nous choisissons le type de pompe et de panneau solaire que le programme nous donne en vert.

Et le programme calculera automatiquement le nombre série et parallèle, on click on «48Regulation» :

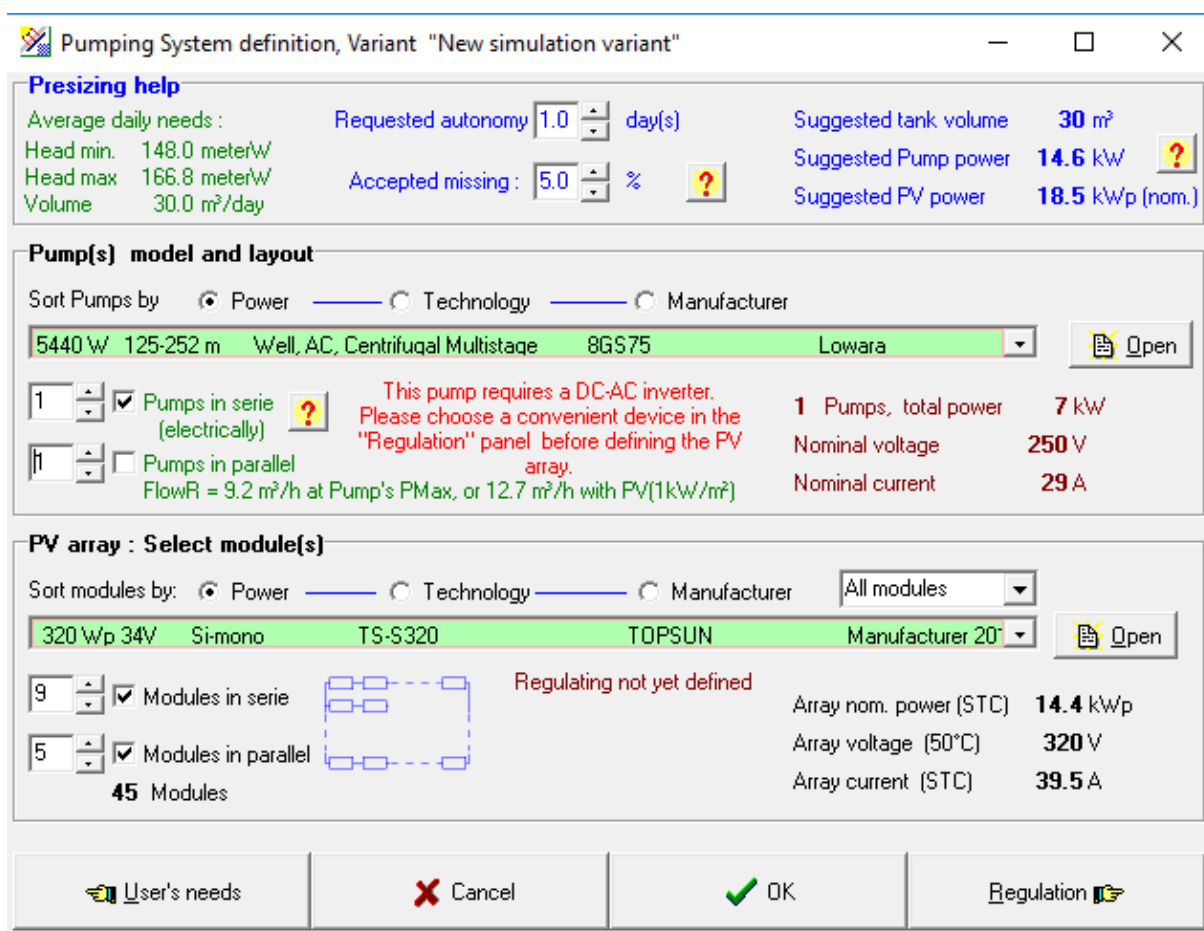


Figure 4.10 : Etape 10 PVsyst

Et choisissez «49MPPT-AC inverter » , puis on click on «49OK » pour faire la retour à la première interface :

Pumping system definition - Further system characteristics

PV array summary
 45 PV modules of 320 Wp
 TOPSUN, model TS-S320
 Array oper. (50°C, 1000 W/m²):
 Pmpp=12.6 kW, Vmpp=320 V

System operating
 Regul. **MPPT-AC inverter**

Pump characteristics
 One pump
 Lowara, model 8GS75
 Type: Centrifugal Multistage (Deep well pump)
 Motor type: Async. AC motor, monophased
 Nominal operating conditions :
 Pressure=147 meterW, Flowrate=10.2 m³/h

Regulator / Power conditioning device
 Default regulator MPPT-AC inverter Default MPPT to AC Inverter Generic device **Open**

Battery set
 Batteries in serie Batteries in parallel Battery pack voltage **Undef V**
 Global capacity **Undef Ah**

System **Cancel** **OK** **Array losses**

Figure 4.11 : Etape 11 PVsyst

Maintenant qu'ils sont tous devenus verts, nous pouvons appuyer sur «50Simulation» :

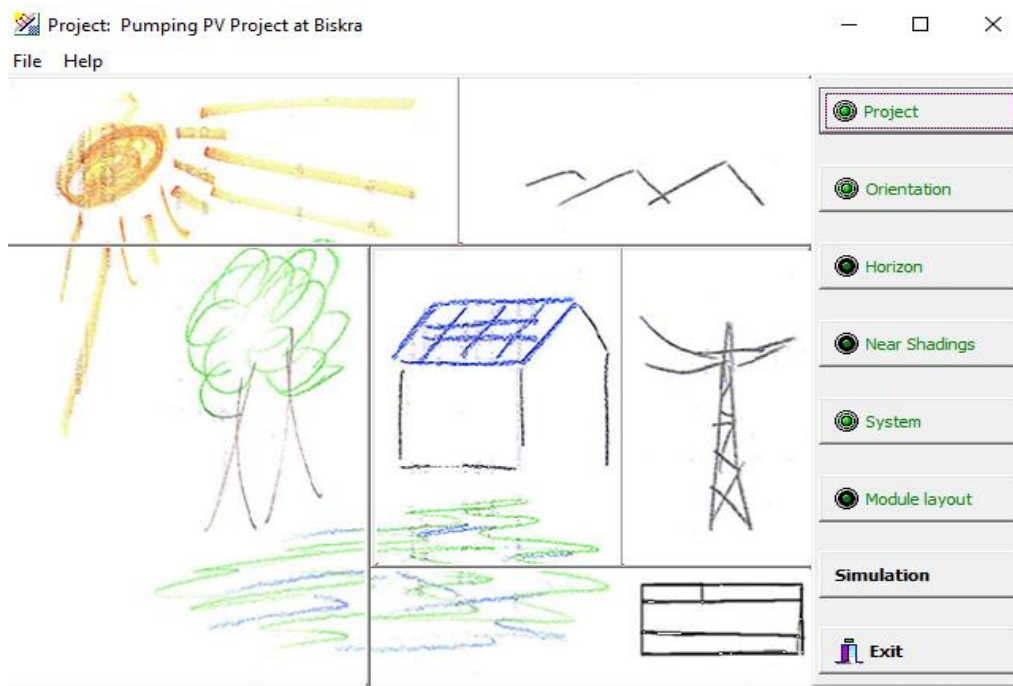


Figure 4.12 : Etape 12 PVsyst

Puis «50Simulation» pour extraire le rapport final :

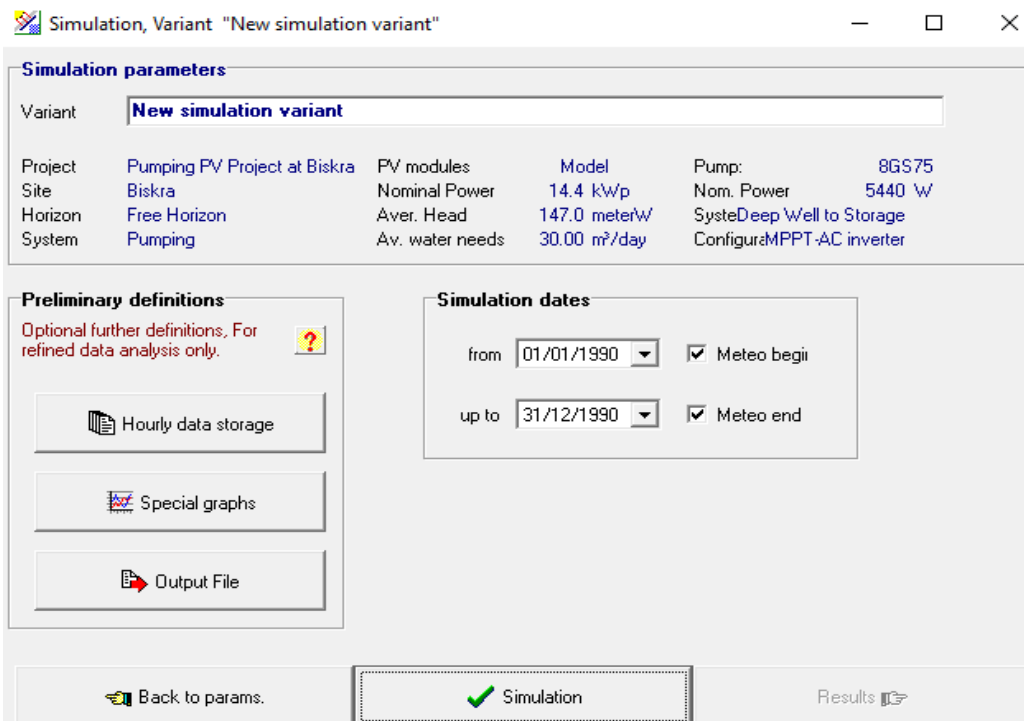


Figure 4.13 : Etape 13 PVsyst

Ceci est le rapport final qui rassemble tout ce qui concerne l'étude :

PVSYST V5.74		03/07/21	Page 1/4
Pumping PV System: Basic simulation parameters			
Project :	Pumping PV Project at Biskra		
Geographical Site	Biskra	Country	Algeria
Situation	Latitude 34.8°N	Longitude	5.7°E
Time defined as	Legal Time	Time zone	UT+1
	Albedo	Altitude	170 m
Meteo data :	Biskra, Synthetic Hourly data		
Simulation variant :	New simulation variant		
	Simulation date	03/07/21 15h22	
Simulation parameters			
Pumping System parameter	System type	Deep Well to Storage	
Well characteristics	Static level depth	147 m	Specific drawdown 0.00 m / m ³ /h
(Diameter 50 cm)	Pump depth	150 m	Max. pumping depth 149 m
Storage tank	Volume	30.0 m ³	Diameter 3.4 m
Feeding by top	Feeding altitude	1.0 m	Height (full level) 2.0 m
Hydraulic circuit	Piping length	154 m	Pipes PE32 (1"1/4) Dint = 35 mm
	Number of elbows	4	
Water needs	Yearly constant:	30.00 m ³ /day	
Pump	Model	8GS75	
	Manufacturer	Lowara	
Pump Technology	Centrifugal Multistage	Deep well pump	Motor Async. AC motor, monophaser
Associated or Integrated converter	Type	MPPT	Voltage range 100 - 600 V
Operating conditions	Head Min	Head Nom	Head Max
	125.0	210.0	252.0 mWater
Corresponding maximum Flow Rate	11.04	7.80	3.96 m ³ /h
Required power	7375	7320	5440 W
Collector Plane Orientation	Tilt	28°	Azimuth 0°
PV Array Characteristics			
PV module	Si-mono	Model	TS-S320
		Manufacturer	TOPSUN
Number of PV modules	In series	9 modules	In parallel 5 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	45	Unit Nom. Power 320 Wp
Array global power	Nominal (STC)	14.40 kWp	At operating cond. 12.64 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	320 V	I mpp 39 A
Total area	Module area	96.5 m²	Cell area 86.1 m ²
Control device	Model	Generic device (optimised for the system)	
	System Configuration	MPPT-AC inverter	

Pumping PV System: Main results

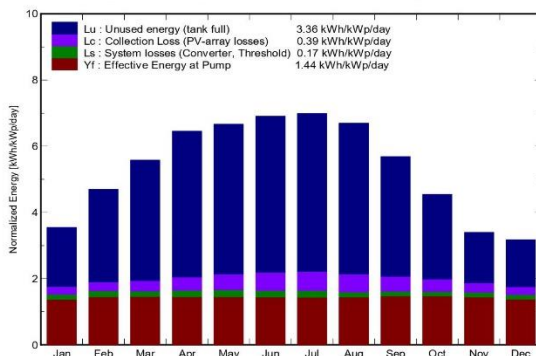
Project : Pumping PV Project at Biskra
Simulation variant : New simulation variant

Main system parameters	System type	Deep Well to Storage	
System Requirements	Basic Head	148.0 meterW	Water needs 30.0 m ³ /day
Pump	Model / Manufacturer	8GS75 / Lowara	
PV Array	Model / Manufacturer	TS-S320 / TOPSUN	
	Nb. of modules	9 S x 5 P	Array Power 14400 Wp
System Configuration	Control Strategy	MPPT-AC inverter	

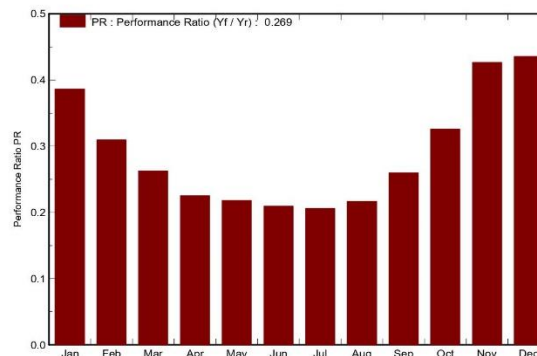
Main simulation results

System Production	Water Pumped	10750 m³	Specific	46 m ³ /kWp/bar
	Water needs	10950 m ³	Missing Water	1.8%
	Energy At Pump	7586 kWh	Specific	0.71 kWh/m ³
	Unused PV energy (Tank full)	11803 kWh	Unused Fraction	53.4 %
	System efficiency	34.3 %	Pump efficiency	66.5 %

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 14.40 kWp



Performance Ratio PR



New simulation variant Balances and main results

	GlobEff	EArrMPP	E PmpOp	ETkFull	H Pump	WPumped	W Used	W Miss
	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	meterW	m ³	m ³	m ³
January	106.8	1368	612.5	603	164.1	863.2	878.2	51.79
February	128.0	1610	587.4	815	166.3	826.4	803.9	36.08
March	168.3	2052	653.6	1121	166.0	930.0	930.0	0.00
April	187.9	2206	627.8	1210	166.1	886.7	886.7	13.27
May	200.2	2265	649.0	1268	166.5	930.0	930.0	0.00
June	200.5	2204	624.8	1309	167.1	900.0	900.0	0.00
July	210.3	2264	643.3	1348	166.9	930.0	930.0	0.00
August	201.4	2188	646.5	1309	166.8	930.0	930.0	0.00
September	165.9	1881	638.7	1041	164.3	898.8	900.0	0.00
October	136.6	1628	660.1	809	162.5	920.3	920.3	9.67
November	98.9	1227	626.0	491	162.1	868.7	868.7	31.30
December	95.2	1219	616.3	478	162.3	865.6	865.6	64.37
Year	1900.1	22113	7586.1	11803	165.0	10749.8	10743.5	206.49

Legends:	GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings	H Pump Average total Head at pump
	EArrMPP Array virtual energy at MPP	WPumped Water pumped
	E PmpOp Pump operating energy	W Used Water drawn by the user
	ETkFull Unused energy (tank full)	W Miss Missing water

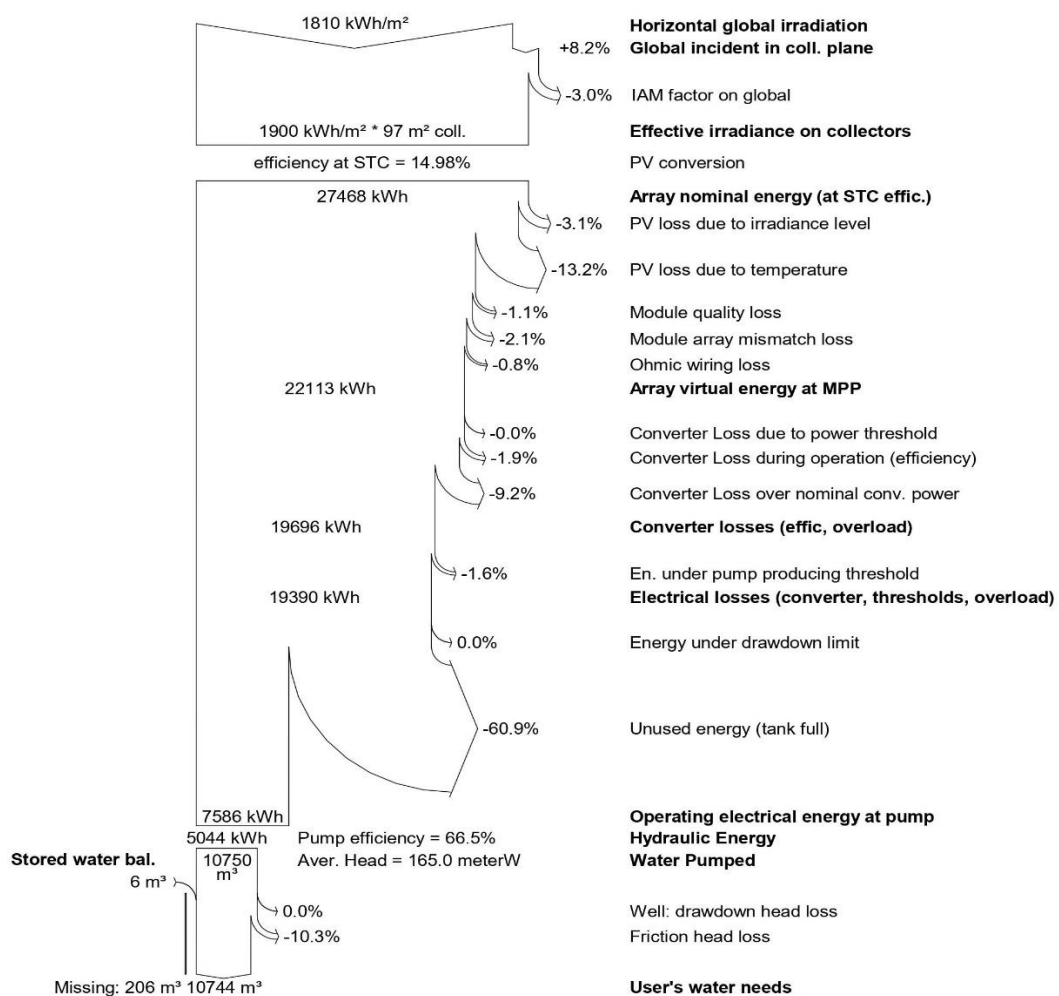
PVSYST V5.74		03/07/21	Page 2/4
Pumping PV System: Detailed Simulation parameters			
Project :	Pumping PV Project at Biskra		
Simulation variant :	New simulation variant		
Main system parameters	System type	Deep Well to Storage	
System Requirements	Basic Head	148.0 meterW	Water needs 30.0 m ³ /day
Pump	Model / Manufacturer	8GS75 / Lowara	
PV Array	Model / Manufacturer	TS-S320 / TOPSUN	
	Nb. of modules	9 S x 5 P	Array Power 14400 Wp
System Configuration	Control Strategy	MPPT-AC inverter	
System Operating Control	(Generic device, params adjusted acc. to the system)		
Power conditioning unit	MPPT - AC inverter		
Operating conditions	Minimum MPP Voltage	100 V	nominal power 7680 W
	Maximum MPP Voltage	600 V	Power Threshold 77 W
	Maximum Array Voltage	800 V	Max. efficiency 97.0 %
	Maximum Input Current	29.3 A	EURO efficiency 96.0 %
PV Array loss factors			
Thermal Loss factor	Uc (const)	20.0 W/m ² K	Uv (wind) 0.0 W/m ² K / m/s
=> Nominal Oper. Coll. Temp. (G=800 W/m ² , Tamb=20°C, Wind=1 m/s.)			NOCT 56 °C
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	139 mOhm	Loss Fraction 1.5 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction 1.0 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction 2.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	bo Parameter 0.05

Pumping PV System: Loss diagram

Project : Pumping PV Project at Biskra
Simulation variant : New simulation variant

Main system parameters	System type	Deep Well to Storage	
System Requirements	Basic Head	148.0 meterW	Water needs 30.0 m ³ /day
Pump	Model / Manufacturer	8GS75 / Lowara	
PV Array	Model / Manufacturer	TS-S320 / TOPSUN	
	Nb. of modules	9 S x 5 P	Array Power 14400 Wp
System Configuration	Control Strategy	MPPT-AC inverter	

Loss diagram over the whole year



Conclusion général

Conclusion Générale

Dans Le présent mémoire, nous avons traité plus particulièrement des aspects techniques et économiques d'une solution de pompage d'eau en utilisant une source d'énergie solaire photovoltaïque. Nous avons donné un aperçu sur l'énergie photovoltaïque, ces avantages et ces inconvénients et les différents systèmes photovoltaïques en générale. Notre travail est porté essentiellement sur l'étude et dimensionnement d'un système de pompage PV sans batterie, que nous avons simulé à l'aide du logiciel PVsyst.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références

- [1] : Degla Mohammed et Larbi Ben Ahmed Bachir, Mémoire de MASTER PROFESSIONNEL, Domaine Sciences et Technologies, « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque » Filière Electronique, Spécialité Instrumentation, université kasdi merbah ouargla, 2017.
- [2] <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/371.htm>
- [3]:J. R. Potebaum : « Optimal Characteristics Of A Variable Frequency Centrifugal Pump Motor Drive», IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-20, N. 1, pp. 23-31, Feb. 1984.
- [4] http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp,2007
- [5] N. AIT KHELIFA « Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque utilisant un moteur synchrone à commutation naturelle », Mémoire de Maste2, Université de Bejaïa, 2011.
- [6] P. BESSEMOULIN, J. OLIVIERI « Rayonnement solaire et sa composante ultraviolette » la météorologie série 8-N° 31, pp (42-59), 2000.
- [7] : Degla Mohammed et Larbi Ben Ahmed Bachir, Mémoire de MASTER PROFESSIONNEL, Domaine Sciences et Technologies, « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque » Filière Electronique, Spécialité Instrumentation, université kasdi merbah Ouargla, 2017.
- [8] B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », juin 07, STI ELT Approche générale.
- [9] : BELHADJ Mohammed ; Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome Mémoire de Magister ; Centre Universitaire De Bechar ; 2008 ; page 7.
- [10]: K. Benlarbi, L. Mokrani, M. S. Nait-Said, « A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system », a LSPIE Laboratory, Electrical Engineering Department, Engineering Science Faculty, Batna University,2004.
- [12]:Q. Kou, S.A. Klein, W.A. Beckman : « A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems », Solar Energy, Volume 64, Issues 1–3, September 1998, Pages 33–40

- [13] A. BELHOCINE et S.ZAIDI « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master2. Université de Bejaïa, 2012
- [14] http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique
- [15] <http://www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com/avantages-inconvenients.htm>
- [16]: A. Oi. « Design and simulation of photovoltaic water pumping system », These de Doctorate, California Polytechnic State University San Luis Obispo, 2005
- [17]: B. Molle, « Les stations de pompage individuelles pour l'irrigation », juin 1996
- [18]: J. Royer, T. Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, 2002.
- [19]: M. Angel, C. Pastor, « Conception et réalisation de modules Photovoltaïque électroniques » Thèse de Doctorat « Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [20]: B. Azoui et M. Djarallah, « Dimensionnement et expérimentation d'un système photovoltaïque de pompage d'eau utilisant un moteur à aimants permanents sans balais collecteur », Journée d'Etude sur l'Energie Solaire, Mardi 01 mars 2005, Bejaia.
- [21] http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique.
- [22] M. T. BOUKADOUM, A. HAMIDAT et N. OURABIA « Le Pompage Photovoltaïque » Revue des Energies Renouvelables. : Zones Arides pp (69- 73) ,2002.
- [23] M. Capderou, « Atlas solaire de l'Algérie », Office des publications universitaire
Tome 1' Tome 2, Algérie 1986.
- [24] AFIA SEIDOU Imorou, « Etude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du Bénin : cas de adjakpata », Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur 2^{ie} avec le grade de master, Promotion [2015/2016] Institut International d'Ingénierie. BURKINA.
- [25] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque ».
- [26] DEGLA Mohammed Larbi -BEN AHMED Bachir, « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque », Mémoire de master 2017, Université kasdi Merbah Ouargla.

[27] www.energieplus-lesite.be

[28] LORENTZ GmbH & Co. KG, Système de pompe solaire immergée pour puits 4".

[29] GOUVERNORAT MÉDENINE RAPPORT SUR CHOUAMEKH R. ENNAGUEB « Étude de conception détaillée Pour Le projet d’approvisionnement en eau des Zones rurales en Tunisie », Mars 2001.

[30] OURS BLANC DES CARPATHES, « Introduction à C++ Builder », Isima 1988-1999, http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/intro_cpp_builder.pdf

[31] Jean-Loup PRENSIER – Christophe DAUX, « La chaîne d’énergie du pompage de l’eau », Edité le 17/05/2006

[32] Melle BACHSAIS Iméne, Melle SEBBAGH Asma, « Optimisation d’un système de pompage photovoltaïque pour l’irrigation d’un hectare de palmier dattier en utilisant les méthodes Méta heuristiques », Mémoire de Master 2016, université M’Hamed Bougara de Boumerdes.

[33] Global Tools <https://www.gt-outillage.com/motopompe-haute-pression-essence->

[34] HAMDI Abderrazzak, « Conception et dimensionnement d’un système Photovoltaïque pour habitation et pompage », Mémoire de master 2017 – 2018, Université Mohamed Khider de Biskra.